



**Mariana Paulino
Santos**

**Aplicação Estrutural de Cortiça para Melhoria da
Segurança Passiva em Caso de Impacto**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

*“There ain't no rules around here!
We're trying to accomplish something!”*

Thomas Alva Edison (1847-1931)
Inventor Norte-Americano

o júri

presidente

Professor Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo
Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Doutora Celina Pires Gameiro
Engenheira de Desenvolvimento da Bosch Tecnologia S.A.

Professor Doutor Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao Professor Doutor Filipe Teixeira-Dias, professor e orientador, com quem tive o prazer de trabalhar e que me ofereceu os seus conhecimentos e amizade. Pelo apoio incansável e pela disponibilidade constante que ofereceu.

À Doutora Celina Pires Gameiro pelos dados cedidos e pelas indicações preciosas para o desenvolvimento deste trabalho. Acima de tudo, agradeço a disponibilidade constante manifestada.

Ao Professor Doutor José Maria Cirne pelo apoio disponibilizado para a realização deste projecto.

Ao Rui, meu colega, pelo apoio facultado.

Aos colegas de trabalho pelo apoio, boa disposição, troca de ideias e pela revigorante “hora da nata”.

Ao Filipe e aos meus amigos pela paciência e compreensão, e sobretudo, por estarem sempre presentes

Aos meus pais, pelo estímulo e apoio incondicional desde o primeiro minuto.

palavras-chave

crashworthiness, segurança passiva, absorção de energia, materiais celulares, impacto, *padding*, cortiça, simulação numérica, método dos elementos finitos.

resumo

Neste trabalho procura-se explorar a capacidade da cortiça de actuar como material dedicado à absorção de energia de impacto, no âmbito da segurança passiva automóvel. Estudam-se numericamente os benefícios da implementação de *padding* de cortiça micro-aglomerada no interior das portas laterais dos veículos, fundamentalmente em termos de protecção da zona pélvica dos ocupantes, através de simulação numérica de colisões laterais.

Desenvolve-se um estudo numérico detalhado sobre alguns dos materiais celulares com aplicação em sistemas de absorção de energia. Faz-se a caracterização do comportamento mecânico ao impacto da espuma de poliuretano, do IMPAXX™, da espuma de Alumínio e do micro-aglomerado de cortiça, recorrendo ao programa de elementos finitos LS-Dyna™. Os resultados obtidos relativamente à capacidade de absorção de energia mostram ser a espuma de poliuretano a que, globalmente, apresenta piores resultados. Para as mesmas condições de ensaio, o IMPAXX™, a cortiça e a espuma de Alumínio apresentam comportamentos bastante semelhantes e verifica-se que a espuma de Alumínio é o material com maior capacidade de absorção de energia, logo seguido pela cortiça. Já em termos de energia absorvida específica, estes materiais apresentam um comportamento bastante distinto, sendo o IMPAXX™ o que melhores resultados apresenta, seguido pela cortiça. Em termos de pico de aceleração de impacto, a espuma de poliuretano é a que apresenta valores mais elevados, seguida pelo IMPAXX™. A cortiça micro-aglomerada e a espuma de Alumínio apresentam valores mais reduzidos. A cortiça apresenta os melhores valores de pico de aceleração para valores elevados de energia inicial do impacto. Propõe-se um índice de desempenho que permite quantificar as prestações de cada material em termos de dissipação de energia de impacto.

Na segunda fase deste trabalho, desenvolve-se um modelo simplificado da estrutura de um automóvel e do impactor utilizado na realização de *crash tests* de colisão lateral. Estuda-se numericamente a aplicação prática de cortiça micro-aglomerada confinada no interior da porta lateral do automóvel. Confrontam-se os resultados obtidos com e sem confinamento de cortiça no interior da porta. Observa-se uma significativa melhoria em termos de pico de aceleração, quando é implementado o *padding*, na ordem dos 89%. No que respeita à energia absorvida pela estrutura do automóvel, a diferença entre os resultados não é tão significativa, verificando-se, no entanto, um aumento de cerca de 9% de energia absorvida pela estrutura com cortiça confinada. Relativamente à intrusão no habitáculo do ocupante, verificam-se benefícios em cerca de 10%.

keywords

crashworthiness, passive safety, energy absorption, cellular materials, impact, padding, cork, numeric simulation, finite element method.

abstract

Cork efficiency as a material dedicated to energy absorption under impact loading is studied in the present work, especially in terms of vehicle passive safety. The benefits of the attachment of micro-agglomerated cork padding in the side door's interior, in terms of protection provided to the occupant pelvic area, is studied with numerical simulations of side impact crashes.

Initially, a detailed numeric study on some cellular materials with application in energy absorption systems is developed. The mechanical behavior under impact loading of polyurethane foam, IMPAXX™, Aluminum foam and micro-agglomerated cork is studied, using the finite element method with LS-Dyna™.

The results regarding energy absorption capacity show the polyurethane foam as the least convenient, in general. For the same simulation conditions, IMPAXX™, Aluminum foam and cork show a very similar behavior, being the Aluminum foam the material which presents the greatest results, followed by cork. However, in terms of specific energy absorption, these materials exhibit a considerably different behavior, being IMPAXX™ the one with better results followed by micro-agglomerated cork. In what concerns the acceleration peak results, polyurethane foam presents the highest values, followed by IMPAXX™. Micro-agglomerated cork and Aluminum foam show lower, thus, better results. For lower values of impact initial energy, micro-agglomerated cork is the one with the lowest peak acceleration values. A performance index is proposed for evaluating each material performance in terms of impact energy dissipation.

In the second part of this work, a simplified model of the vehicle structure and impactor is developed, according to side impact crash tests' configuration. A numerical study of the application of micro-agglomerated cork in the side door interior is developed. Results obtained with and without cork padding show a significant improvement in the peak acceleration value with padding implementation, of nearly 89%. In terms of absorbed energy by the vehicle structure, the difference is not as significant, though resulting in a 9% increase of absorbed energy by the structure with the cork padding included. Concerning the door intrusion it presents benefits of about 10%.

Conteúdo

I	Enquadramento e Objectivos	1
1	Enquadramento	3
1.1	Impacto automóvel e <i>crashworthiness</i>	3
1.1.1	Situação actual	3
1.1.2	Impacto, segurança passiva e <i>crashworthiness</i>	5
1.1.3	Estado da arte	7
1.1.4	O papel fundamental dos materiais na segurança passiva	10
1.2	A cortiça: um material celular natural	12
1.2.1	Formação e crescimento	12
1.2.2	Produção de cortiça	14
1.2.3	Estrutura da cortiça	15
1.2.4	Estado da arte	18
2	Objectivos	23
3	Guia de Leitura	25
II	Caracterização Mecânica dos Materiais	27
4	Procedimentos e Métodos	29
4.1	Configuração dos ensaios numéricos	29
4.1.1	Modelação em LS-Dyna TM	31
4.2	Espuma de Alumínio	32
4.2.1	Seleção da malha de elementos finitos	33
4.3	IMPAXX TM	39
5	Ensaio de Caracterização	45
5.1	Comportamento mecânico da espuma de Alumínio	45
5.2	Comportamento mecânico do IMPAXX TM	52
5.3	Comportamento mecânico da espuma de poliuretano	55
5.4	Comportamento mecânico da cortiça micro-aglomerada	60
6	Resultados e Discussão	65
6.1	Capacidade de absorção de energia	65
6.1.1	Índice de desempenho de absorção de energia	66
6.2	Análise da intrusão	71

III	Modelação Numérica	73
7	Procedimentos e Métodos	75
7.1	Modelação do ensaio	75
7.1.1	Modelo do impactor	76
7.1.2	Modelo do automóvel sujeito ao impacto	80
7.2	Modelação em LS-Dyna TM	82
7.2.1	Modelo de elementos finitos do impactor	82
7.2.2	Modelo de elementos finitos da porta	82
7.2.3	Modelo de elementos finitos das molas	83
7.2.4	Modelo de elementos finitos do <i>padding</i>	83
7.2.5	Definição de contactos e condições de fronteira	83
8	Resultados e Discussão	87
IV	Discussão e Conclusões	93
9	Discussão e Conclusões Gerais	95
	Lista de Figuras	99
	Lista de Tabelas	103
	Bibliografia	105

Parte I

Enquadramento e Objectivos

Capítulo 1

Enquadramento

Neste primeiro capítulo apresentam-se os tópicos envolvidos e tratados durante o desenvolvimento da dissertação e explicam-se conceitos relativos à protecção contra impacto, *crashworthiness* e absorção de energia. Referem-se alguns materiais tipicamente utilizados em situações de impacto e descreve-se mais especificamente a cortiça e as suas potencialidades. Inclui-se a revisão bibliográfica referente a trabalhos de investigação realizados que se contextualizam neste projecto.

1.1 Impacto automóvel e *crashworthiness*

1.1.1 Situação actual

De acordo com estatísticas da *World Health Organization* (WHO), os acidentes de viação constituem uma das principais causas de morte a nível mundial. Cerca de 1.2 milhões de pessoas morrem em acidentes de viação todos os anos e cerca de 50 milhões sofrem ferimentos. As estimativas indicam que até 2024 estes números aumentarão cerca de 65% se não forem aplicadas medidas de prevenção mais rígidas e/ou inovadoras [WHO 04]. Em Portugal, só no ano de 2006, registaram-se mais de 35,000 acidentes de viação, dos quais resultaram cerca de 48,000 vítimas [ANSR 07].

Os acidentes de viação podem ser classificados de acordo com a sua natureza como (i) atropelamento, (ii) despiste ou (iii) colisão. Entre estes, a colisão é o tipo de acidente mais frequente, representando 52.9% dos acidentes dos quais resultam 57.1% das vítimas [ANSR 07].

Mais de 90% das vítimas são consequência de colisões com outros veículos. Estas colisões podem ser frontais, traseiras ou laterais, sendo que estas últimas são responsáveis por 38.9% das vítimas, seguido das colisões frontais, com 27.6% e, por último, as colisões traseiras, responsáveis por 18.8% das vítimas [ANSR 07].

Nos últimos anos têm vindo a realizar-se esforços de naturezas diversas para tentar contrariar a tendência de aumento do número de acidentes de viação, sobretudo nas áreas de prevenção de acidentes, prevenção de ferimentos em caso de acidente e cuidados médicos.

Nas primeiras décadas do século XX observou-se um período de génese, crescimento e desenvolvimento da compreensão do complexo processo que é uma colisão entre veículos. Entre os anos 1980 e 2000 observou-se um decréscimo de 47% nas fatalidades causadas por colisões automóveis, com especial realce para melhorias em situações de impacto frontal. Um estudo recente afirma que o risco de lesão dos ocupantes de veículos produzidos antes de 1984 é três vezes superior ao de ocupantes de um veículo concebido recentemente [WHO 04].

O sector automóvel tem sido alvo de fortes pressões, internas e externas à própria indústria automóvel, que têm vindo a determinar uma nova orgânica para a indústria e uma alteração das linhas de base do conceito do produto. O principal motivador desta evolução tem sido o crescente nível de exigência do consumidor final, que se torna cada vez mais consciente da qualidade do veículo em termos de imagem, conforto, desempenho dinâmico, fiabilidade e, claro, segurança. Com o aparecimento de instituições como a Euro NCAP – *European New Car Assessment Programme* – o lançamento de qualquer novo modelo automóvel tornou-se também resultado de um processo mais cauteloso. A Euro NCAP é uma entidade europeia independente que realiza testes destrutivos (*crash tests*) com alguns dos automóveis mais populares lançados no mercado europeu. O objectivo da Euro NCAP é fornecer ao consumidor uma avaliação imparcial e realista do desempenho do veículo ao nível da segurança passiva. Por um lado, oferece ao consumidor final do produto informações objectivas relativas à segurança oferecida pelos diferentes modelos testados. Por outro, promove as marcas de automóveis que se empenham com sucesso em providenciar essa mesma segurança aos utentes do seu produto.

Mais recentemente, pressões legais e ambientais têm vindo a assumir igual importância, especialmente em torno da segurança e do impacto ambiental do ciclo de vida do produto.

Assim, assiste-se actualmente a um período de pesquisa e introdução de novas soluções no sector automóvel, sobretudo em termos de segurança. Sistemas de apoio à condução, como sistemas de controlo de travagem, controlo de tracção ou de estabilidade, fazem parte do sistema que promove a prevenção de acidentes – a segurança activa. Sistemas como o *airbag*, os cintos de segurança ou a utilização de novas tecnologias e materiais no projecto do veículo e do habitáculo dos ocupantes constituem o sistema de segurança passiva, inerente à protecção de ocupantes em situação de impacto.

Como referido anteriormente, esta transformação do sector automóvel tem vindo a ser acompanhada pelo aparecimento de novas normas ambientais que se traduzem, por um lado, na procura de menores consumos de combustível e, por outro, na procura de materiais e tecnologias de fabrico que proporcionem um menor impacto ambiental do produto em termos de todo o seu ciclo de vida.

Ao encontro de menores consumos de combustível e maior segurança passiva, realizam-se esforços no sentido de reduzir o peso total do veículo, desenvolvendo estruturas mais leves, com maior resistência ao impacto e melhor desempenho dinâmico. Esta abordagem leva, portanto, a maiores investimentos na procura de materiais alternativos, mais leves e passíveis de reciclagem.

1.1.2 Impacto, segurança passiva e *crashworthiness*

Durante a colisão de um automóvel dá-se a desaceleração de toda a sua estrutura num intervalo de tempo relativamente curto, frequentemente na ordem dos milissegundos. Por isso, toda a energia cinética do sistema é rapidamente transformada em trabalho interno à estrutura – dissipação de energia. De forma a garantir a adequada protecção dos ocupantes de um veículo, é desejável que essa energia seja absorvida de forma controlada e/ou a uma taxa pré-determinada, de maneira a não exceder o valor de desaceleração que o corpo humano pode suportar. A capacidade que uma estrutura tem, e qualquer dos seus componentes, de proteger o ocupante em situações de impacto é geralmente traduzida pela capacidade da estrutura do veículo se deformar plasticamente e, deste modo, absorver a energia do impacto, mantendo a integridade do habitáculo de forma a garantir a protecção dos ocupantes. Esta capacidade de protecção é frequentemente designada pelo termo inglês *crashworthiness*.

A concepção de um veículo provido de bom nível de *crashworthiness* deve satisfazer um conjunto determinado de requisitos. Para começar, a estrutura deve oferecer suficiente resistência à flexão e à torção para fácil condução e manobra do veículo. Deve ainda minimizar vibrações longitudinais de alta frequência e deve exibir um pico de desaceleração adequado a uma determinada gama de dimensões e idades dos ocupantes, e de velocidades de impacto, para ambos os sexos. Em termos gerais, a estrutura de um automóvel deve preencher os requisitos que se apresentam nos pontos seguintes [Bois 04]:

- Ter uma estrutura frontal deformável, no entanto rígida, com zonas irregulares (*crumple zones*) de modo a absorver energia cinética em situações de colisão frontal através de deformação plástica e prevenir a intrusão no habitáculo do veículo. Especial relevo deve ser dedicado às colisões frontais com desfasamento (*offset*) e colisões com objectos delgados como, por exemplo, árvores ou postes.
- Ter uma estrutura traseira deformável de modo a manter a integridade do espaço dos passageiros nos lugares traseiros e proteger o depósito de combustível.
- Ter estruturas (pilares) e portas laterais concebidas adequadamente de maneira a prevenir a intrusão em colisões laterais e a abertura das portas pelos esforços de impacto.
- O tejadilho deve ser suficientemente rígido, de forma a garantir a integridade do habitáculo em situações de capotamento.
- Estar adaptada às diversas configurações e disposições do motor, sistemas de tracção e posições de condução.
- Estar equipado com tecnologia de segurança passiva em harmonia com a estrutura do veículo de modo a proporcionar uma condução estável e protecção nos diversos espaços interiores.

De acordo com estatísticas da WHO e do Instituto Nacional de Estatísticas (INE) [INE 07], a colisão lateral é o tipo de impacto que resulta em maior número de vítimas e ferimentos graves por acidente. A protecção contra este tipo de colisão sempre

representou um desafio de projecto de engenharia, principalmente devido ao reduzido espaço existente entre o passageiro e o objecto impactor. Este facto reduz a capacidade de providenciar sistemas de controlo de absorção de energia, como no caso da colisão frontal.

Existem já, e continuam em desenvolvimento, mecanismos de segurança passiva cujo objectivo é proteger o ocupante numa situação de choque lateral. Exemplo disso é o cinto de segurança, os *airbags* laterais e as barras protectoras laterais. No entanto, dada a sua geometria, o cinto de segurança não se mostra tão eficaz para este tipo de acidentes, como se mostra para colisões frontais [GAO 95]. Numa colisão lateral os ocupantes deslizam com maior facilidade. Adicionalmente, graças à posição sentada do ocupante, o potencial de ejeção da cabeça através do vidro lateral é maior devido à falta de protecções laterais para a cabeça. Outro exemplo de uma aplicação para protecção em impacto lateral é a implementação de *paddings* no interior das portas laterais. Os *paddings* consistem em estruturas construídas com materiais com boa capacidade de absorção de energia, colocadas estrategicamente em zonas de impacto críticas para o ocupante como, por exemplo, a zona pélvica.

De uma forma genérica, a segurança proporcionada pelo automóvel consiste na capacidade que este tem de reduzir a velocidade relativa entre os ocupantes e o interior do veículo, de modo a reduzir o risco de lesão dos ocupantes durante a colisão. De acordo com as leis de Newton, para que seja possível uma redução de velocidade é necessário aplicar uma força ao passageiro. Contudo, esta força, bem como a desaceleração que lhe está associada, deve ser limitada aos valores a que o corpo humano pode ser sujeito sem ferimentos.

A tolerância humana ao impacto, no âmbito das áreas científicas de engenharia, é geralmente definida em termos de proporcionalidade à aceleração da gravidade, isto é, em termos de múltiplos de g . Em que $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ é a aceleração da gravidade. A expressão fundamental da segunda lei de Newton, $F = ma$, pode assim ser reescrita na forma:

$$F = \frac{P}{g}ng, \quad (1.1)$$

em que P representa o peso, n representa a aceleração em múltiplos da aceleração da gravidade e F corresponde à força aplicada.

Organismos como a Euro NCAP ou a norte-americana *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) criaram protocolos e parâmetros de referência para avaliar e classificar, de forma homogénea, a capacidade que a estrutura de um veículo tem de proteger os ocupantes de lesões graves ou ligeiras através da realização de *crash tests* (figura 1.1). Lie e Tingvall [Lie 02] mostraram que, em termos globais, a classificação da Euro NCAP consegue dar uma indicação válida de *crashworthiness*, quando consideradas lesões graves ou fatais, bastante aproximada da realidade. Para a realização desta análise, os autores confrontaram as avaliações atribuídas pela Euro NCAP com resultados obtidos em colisões reais entre automóveis.

A configuração dos testes de colisão lateral realizados pela Euro NCAP está representada esquematicamente na figura 1.2. O teste consiste numa barreira deformável

em movimento (MDB¹) a colidir na porta do lado do condutor a uma velocidade² $v_0 = 13.89$ m/s. A barreira deformável colide com o automóvel na direcção perpendicular ao plano da porta, alinhada com o centro de massa na direcção do ponto R, representado na figura como *R-Point*. A avaliação de lesões resultantes do impacto é feita recorrendo a um modelo antropomórfico (SID³), sentado no lugar do condutor. Este modelo reproduz a reacção do corpo humano em situação de impacto em regiões críticas do corpo como, por exemplo, a cabeça, o peito, a zona torácica e a zona pélvica [NCAP 04].

Os ferimentos são quantificados em termos das acelerações e forças que o modelo antropomórfico experimenta. Para esse efeito, os modelos são munidos de acelerómetros, células de carga e sensores de movimento. Os resultados obtidos durante um *crash test* são posteriormente comparados com os parâmetros de referência considerados pela entidade certificadora, de modo a obter classificações indicadoras do nível de *crashworthiness* do automóvel testado. São exemplos dos critérios contemplados os critérios de lesão na cabeça (HIC – *Head Injury Criterion*), de desaceleração peitoral, de carga no fémur, o índice de trauma torácico (TTI – *Thoracic Trauma Index*) e aceleração pélvica lateral (LPA – *Lateral Pelvic Acceleration*). A Euro NCAP define, além dos valores limite para cada um dos critérios analisados, uma escala global expressa em número de estrelas, sendo cinco estrelas o melhor resultado possível, indicadora do nível de protecção que o automóvel oferece a ocupantes adultos, a crianças e a peões.

1.1.3 Estado da arte

Os estudos realizados no âmbito da segurança passiva automóvel têm-se concentrado sobretudo na optimização estrutural do automóvel, na procura e no desenvolvimento de materiais com maior capacidade de absorção de energia e na criação e melhoria de sistemas para amortecimento do impacto sofrido pelos ocupantes em caso de colisão. No entanto, a pesquisa dedicada à segurança passiva vai além do aperfeiçoamento do automóvel em si, e passa pela procura de ferramentas que tornem o processo de avaliação e de optimização da estrutura automóvel a nível de *crashworthiness*, mais rápido e económico, recorrendo à simulação numérica. Nesta secção pretende-se fazer referência apenas a alguns estudos realizados neste âmbito de modo a apresentar uma síntese dos avanços feitos até à data.

O tipo de colisão alvo de maior número de estudos e objecto de maiores avanços é o impacto frontal. Porém, mais recentemente, tem-se observado um cada vez maior interesse em melhorar a segurança passiva em caso de colisão lateral.

Wang *et al.* [Wang 06] analisaram o impacto da colisão lateral entre dois automóveis e da colisão lateral de um automóvel com um objecto delgado⁴, na estrutura do veículo, através de simulação numérica com LS-DynaTM. Estes autores averiguaram os componentes mais significativos em termos de *crashworthiness* nestes tipos de colisão, concluindo que numa situação de colisão lateral entre dois automóveis, toda a estrutura

¹ Do inglês *Mobile Deformable Barrier*.

² Por uma questão de conveniência, em todo o trabalho serão utilizadas as unidades do Sistema Internacional (SI), sendo este valor o equivalente ao citado na bibliografia, de 50 km/h.

³ Do inglês *Side Impact Dummy*.

⁴ Designado em inglês por *Pole Test*.



Figura 1.1: Exemplo de um *crash test* de impacto lateral.

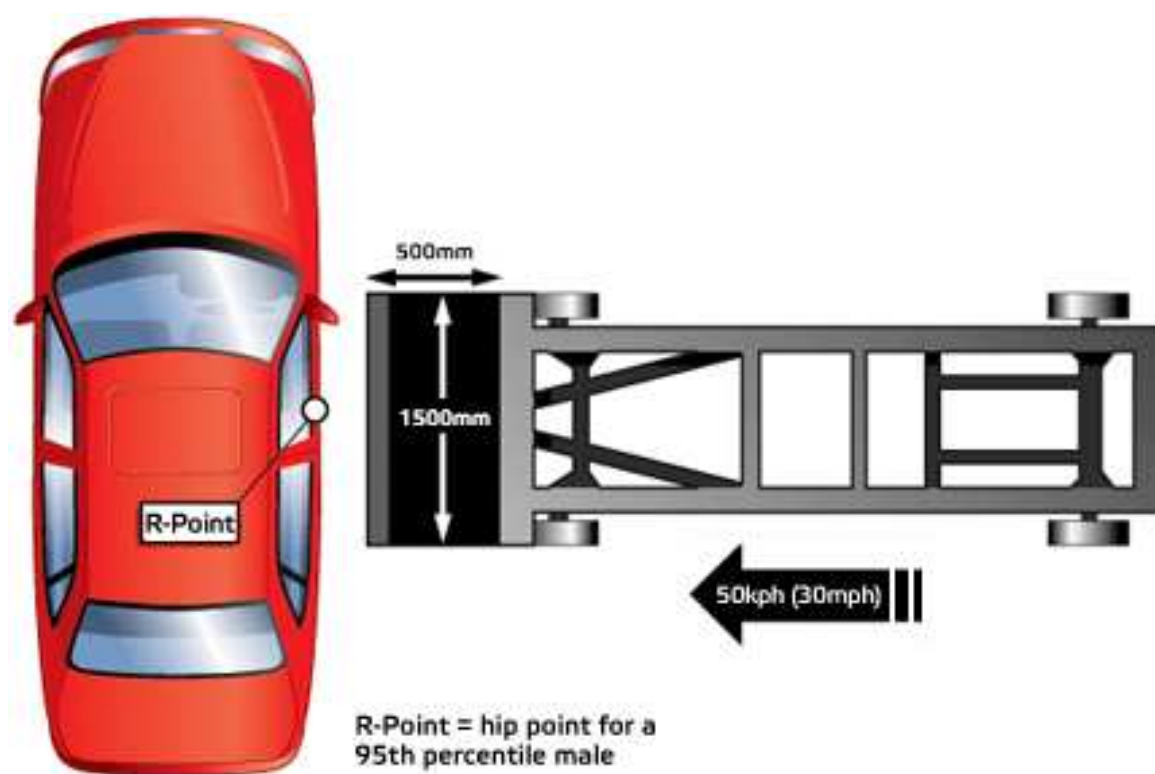


Figura 1.2: Representação esquemática da configuração dos *crash tests* realizados pela Euro NCAP [NCAP 08].

lateral do automóvel (desde os pilares às portas laterais) é crucial, ao contrário da colisão com um objecto delgado.

Em situações de colisão lateral, o risco e/ou a gravidade das lesões dos ocupantes é frequentemente resultado do contacto entre estes e a estrutura lateral do habitáculo [Kim 95], dado o espaço disponível entre a porta lateral e o ocupante ser bastante reduzido. As zonas pélvica e torácica são duas das áreas do corpo humano mais afectadas neste tipo de colisão [Majumder 04, Schiff 08, Samaha 03].

Tencer *et al.* [Tencer 05] realizaram um estudo sobre os factores responsáveis pelas forças exercidas nas zonas pélvica e torácica em colisões laterais, em termos de estrutura automóvel. Para tal, utilizaram dados de três fontes: o *New Car Assessment Program* (NCAP), a *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) e a *Crash Injury Research and Engineering Network* (CIREN). Os resultados obtidos mostraram que o peso do veículo é proporcional à aceleração pélvica e ao índice de trauma torácico (TTI). Observaram ainda que o nível de intrusão da porta era directamente proporcional à aceleração pélvica medida no modelo antropomórfico, bem como ao índice de lesão abreviado (AIS – *Abbreviated Injury Score*). Adicionalmente, analisaram a influência da existência de consolas centrais e verificaram que para níveis de intrusão da porta suficientemente elevados, a probabilidade de fracturas pélvicas aumentava significativamente para automóveis com consolas centrais. Os mesmos autores realizaram, mais tarde, um estudo sobre o mesmo tema, desta vez avaliando a influência da rigidez da consola central como factor de risco na lesão da zona pélvica do ocupante [Tencer 07]. Tencer *et al.* sugerem, neste estudo, que a redução da rigidez da consola central e possibilitar a translação do banco do ocupante, reduziriam em grande medida as lesões provocadas na zona pélvica em colisões laterais. Schiff *et al.* [Schiff 08] realizaram um estudo semelhante, na medida em que também estes autores se propuseram a avaliar os factores de risco em colisões laterais, nomeadamente do ponto de vista de fracturas na zona pélvica. Do mesmo modo, concluíram que o nível de intrusão da porta e do painel lateral constitui o factor mais significativo quando confrontado com o tipo de veículo ou o peso dos veículos intervenientes.

Morris *et al.* [Morris 99] observaram, através da realização de uma série de simulações numéricas de colisão lateral, que o espaço disponível entre o ocupante e a porta lateral se mostra um parâmetro de grande importância nas lesões provocadas no ocupante. Afirmam ainda que este espaço não só influencia a velocidade de impacto, como também o ponto no perfil de velocidade da porta que contacta com o ocupante. Estes autores investigaram ainda os benefícios da utilização de *paddings* de diferentes dimensões no interior da porta e de *airbags* laterais.

Já no século XXI, Majumder *et al.* [Majumder 04] estudaram a resposta dinâmica da pélvis e estabeleceram valores limite à fractura, através de simulação numérica com o programa ANSYS®, em situações de colisão lateral. Majumder *et al.* inferem que com um *design* da porta lateral mais adequado e a inclusão de *paddings* na direcção da zona pélvica, o risco e/ou a gravidade de lesão do ocupante seriam significativamente reduzidos. Lim *et al.* [Lim 97] estudaram também a introdução de material de *padding*, através de simulação de colisões laterais a partir de um modelo criado pelos mesmos, de Corpo Inteiro Articulado (ATB⁵). Com o mesmo modelo, avaliaram ainda o desempenho das barras laterais de protecção e do pilar B em termos de rigidez, sempre do

⁵ Do inglês *Articulated Total Body*.

ponto de vista de protecção da zona pélvica do ocupante.

Em concordância com estudos que têm vindo a ser realizados, torna-se óbvia a importância da implementação de *paddings* como um elemento de absorção de energia em caso de impacto lateral, nomeadamente no que respeita à protecção da zona pélvica do ocupante. O passo seguinte consiste, portanto, na selecção do material e da geometria adequados a este contexto.

1.1.4 O papel fundamental dos materiais na segurança passiva

As exigências crescentes de segurança automóvel resultam geralmente no aumento de peso de um carro convencional. Porém, as exigências ambientais crescem a par das exigências de maior segurança, e as primeiras requerem geralmente uma redução do peso global do automóvel. As exigências são contraditórias e existem essencialmente duas formas de satisfazer ambas: a utilização de novos materiais leves, resistentes e rígidos, e a optimização da estrutura, isto é, tornar a estrutura o mais eficiente possível, sem necessidade de aumentar significativamente o seu peso global.

Quando se pretende avaliar os benefícios da substituição de materiais em componentes automóveis, os aspectos fundamentais que devem ser considerados são os seguintes [Farg 08]:

- Vantagem técnica de desempenho, como resultado da introdução de um material mais resistente, rígido, ou mais leve.
- Vantagem económica inerente a todo o ciclo de vida do produto. Esta vantagem pode ser conseguida como resultado da introdução de um material mais barato, da introdução economicamente mais eficiente do material, do custo mais reduzido de implementação, da melhor reciclabilidade e do custo mais baixo da destruição, ou custos mais reduzidos do produto.
- Introdução de um material mais atractivo esteticamente, com diferente tacto ou que proporcione um ambiente mais confortável para o utilizador, por exemplo, através de isolamento térmico ou acústico.
- Considerações ambientais e legislativas que incluem menor detrimento do ambiente, melhor reciclabilidade ou reutilização, e concordância com as regulamentações ambientais.
- Finalmente, o novo material deve ser mecânica, física e quimicamente compatível com os materiais que o rodeiam.

Os sólidos celulares, em particular espumas poliméricas e metálicas, têm encontrado crescente aplicação industrial na última década, emergindo como uma nova classe de materiais para engenharia, dada a interessante combinação de propriedades que apresentam: reduzido peso específico, elevada rigidez, grande capacidade de absorção de energia, bom isolamento térmico e acústico, entre outras.

Os materiais celulares são materiais bifásicos constituídos por uma matriz sólida e uma matriz fluida, sendo a matriz sólida geralmente composta por metais, cerâmicos, polímeros ou materiais compósitos. A matriz sólida é formada por uma rede interligada

de células unidas pelas arestas e faces de cada uma. Estes materiais podem possuir estruturas desde as mais organizadas, como a quase perfeita semelhança aos favos-de-abelha, às mais desordenadas como, por exemplo, as redes tridimensionais de esponjas e espumas. As estruturas típicas destes materiais são:

- Matrizes bidimensionais de polígonos organizados de forma semelhante à área plana dos favos-de-abelha, que por este motivo são designados por *honeycomb*⁶;
- Estruturas com células poliédricas dispostas tridimensionalmente, sendo as mais comuns, as espumas.

Em termos estruturais os sólidos celulares podem ser classificados como materiais de *célula fechada* ou de *célula aberta* (ver figura 1.3). Nos materiais celulares de célula fechada a fase fluida está envolvida por faces sólidas que separam dois poliedros adjacentes, não existindo comunicação entre as células. Nos materiais de célula aberta, as faces não existem e o sólido está distribuído nas arestas em que as células se contactam, geralmente três a três, podendo o fluido circular através da matriz sólida. Outros materiais celulares podem ser compostos por células abertas e células fechadas.

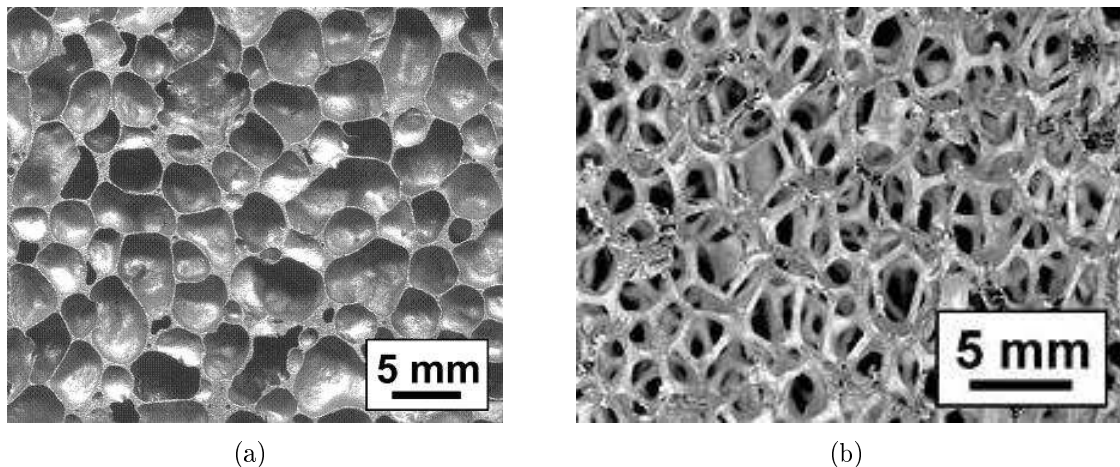


Figura 1.3: Materiais celulares de (a) célula fechada e (b) célula aberta.

Os materiais celulares naturais são utilizados pelo Homem há vários séculos, nomeadamente, a madeira, a cortiça, o osso, os corais ou as esponjas naturais. Mais recentemente, começaram a ser produzidos materiais celulares sintéticos como, por exemplo, as espumas poliméricas, as espumas metálicas e as espumas cerâmicas. Estes materiais têm vindo a ser cada vez mais utilizados, essencialmente em estruturas de isolamento, acolchoamento e em sistemas para absorção de energia de impacto. A combinação única de propriedades dos materiais celulares, propriedades que derivam essencialmente da sua estrutura celular, é o que os torna adequados a estas aplicações.

As propriedades dos materiais celulares dependem directamente da forma e estrutura das células. A propriedade mais importante de um material celular é a sua densidade relativa, ρ^*/ρ_s , isto é, a densidade do material celular ρ^* , dividida pela do sólido constituinte das paredes celulares. A designação de material celular é limitada a

⁶ Tradução inglesa de favo-de-abelha.

materiais com densidade relativa inferior a 0.3. Para valores superiores é já designado como um material sólido com porosidade.

A possibilidade de expansão de materiais alarga extensivamente a gama de propriedades disponíveis para a engenharia. A baixa densidade permite a criação de componentes estruturais leves, rígidos e flutuantes como, por exemplo, os painéis em sanduíche. A baixa rigidez torna estes materiais ideais para uma larga gama de aplicações de acolchoamento. A baixa resistência e as elevadas tensões de compressão tornam os materiais celulares atractivos em aplicações de absorção de energia.

O acondicionamento pode ser visualizado na maioria dos objectos que encontramos à nossa volta. A comida é acondicionada, encomendas postais são acondicionadas, e dentro de um avião ou dentro de um automóvel, nós próprios somos acondicionados. A essência do acondicionamento de protecção é a capacidade de converter energia cinética em outra forma de energia – geralmente calor – através de plasticidade, viscosidade, visco-elasticidade ou fricção. Esta transformação deve ser feita de forma a que o pico de força (logo, também o pico de desaceleração ou aceleração) sentido pelo objecto acondicionado se situe abaixo do valor que lhe causa danos ou lesões. Os materiais celulares são bastante adequados a este tipo de aplicação. A energia é absorvida enquanto as paredes celulares se deformam plasticamente por flexão, encurvadura, ou fractura (dependendo do material de que é constituído). Porém, a tensão é limitada pelo extenso patamar da curva típica de tensão-deformação destes materiais representada na figura 1.4. Através da escolha de um material constituinte das paredes celulares adequado, o material celular pode ser adaptado de forma a apresentar as propriedades ideais para um dado tipo de acondicionamento.

Quando uma estrutura celular é comprimida, é realizado trabalho pelas forças aplicadas. O trabalho por unidade de volume de material a uma determinada deformação ε , é dado pela área abaixo da curva de tensão-deformação até ao valor de deformação ε . Durante o regime linear elástico é absorvida muito pouca energia. É ao longo da zona de patamar desta curva, que se inicia com o colapso das células por encurvadura, cedência ou esmagamento, que se absorvem elevadas quantidades de energia, como se pode observar pelo gráfico da figura 1.4, referente ao comportamento mecânico típico de um material celular [Gibson 97].

1.2 A cortiça: um material celular natural

1.2.1 Formação e crescimento

A cortiça é um material celular natural produzido pelo sobreiro (*Quercus suber* L.), constituindo o revestimento exterior do seu tronco e ramos. A cortiça é extraída do tronco periodicamente, geralmente de nove em nove anos, sob a forma de pranchas com espessura adequada ao processo industrial a que se destina. Na figura 1.5 podem ver-se algumas pranchas de cortiça após extracção do sobreiro. Esta extracção é feita por meio de cortes tangenciais e longitudinais efectuados na casca da árvore. O corte e arrancamento da cortiça são feitos manualmente com auxílio de um machado. Este processo designa-se por *descortiçamento* ou *desbóia*.

O sobreiro é uma árvore de crescimento lento e grande longevidade, que pode atingir 250 – 350 anos de idade, embora se considere que a idade limite para a capacidade de

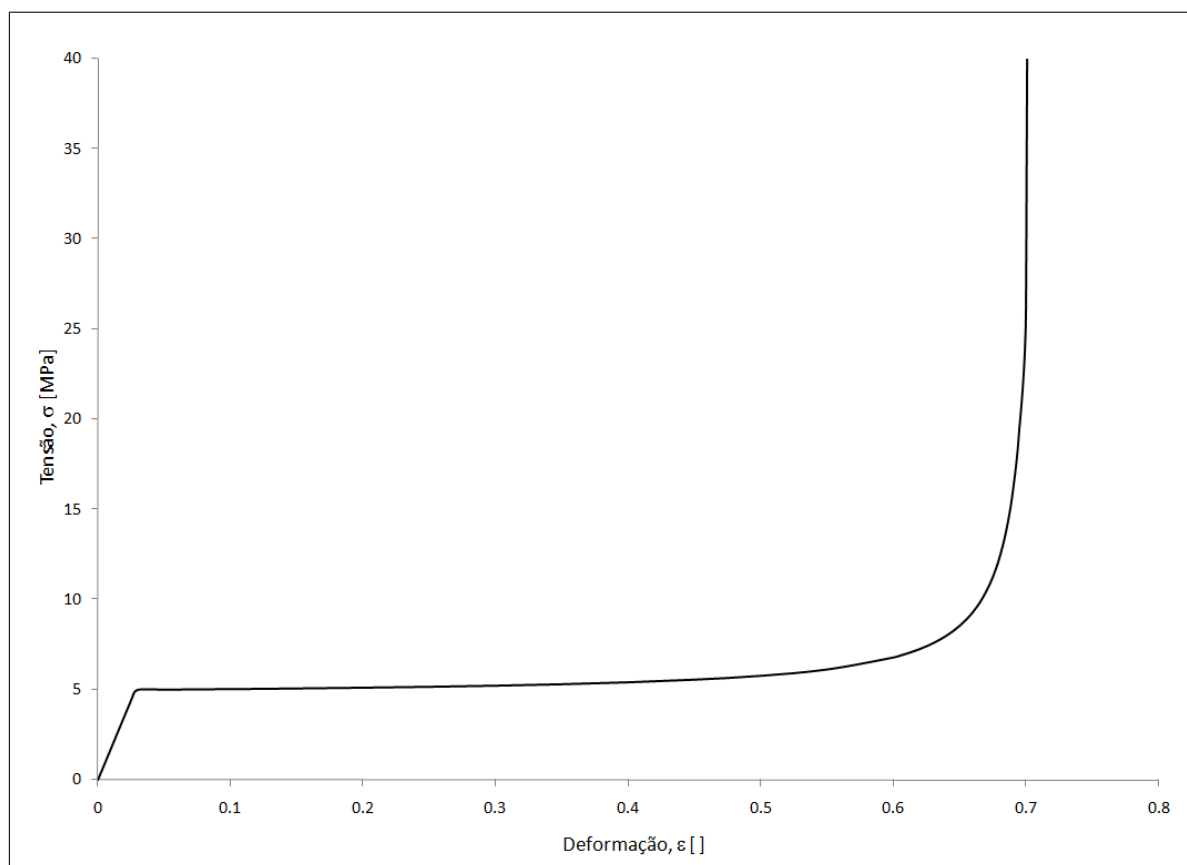


Figura 1.4: Exemplo da curva de comportamento mecânico de um material celular em compressão.

produção de cortiça seja de 150 – 200 anos. Uma vez removida a cortiça, a camada geradora de cortiça (o *felogénio*) é destruída. No entanto, desenvolve-se uma nova camada geradora de cortiça nos tecidos interiores, no *entrecasco*, constituindo um novo felogénio, que recomeça a produzir células de cortiça. Este felogénio designa-se por *felogénio traumático* dado ser a resposta ao trauma provocado pelo descortiçamento. É esta capacidade de regeneração de felogénio, após a extracção da cortiça, que permite a exploração do sobreiro de uma forma sustentada ao longo da vida da árvore, através de sucessivas extracções de cortiça.

A primeira cortiça produzida pelo sobreiro é a *cortiça virgem* e é extraída quando a árvore atinge dimensões consideradas pela prática florestal como adequadas para o primeiro descortiçamento e ocorre entre os 20 e os 35 anos de idade. Neste período o diâmetro da árvore varia geralmente entre os 20 e os 25 cm. A cortiça desta geração apresenta sulcos e fendas verticais significativas, resultantes das fracturas que ocorreram devido às fortes tensões tangenciais originadas pelo crescimento radial do tronco do sobreiro e, por este motivo, destina-se unicamente ao fabrico de aglomerados. A segunda camada de cortiça produzida pela árvore, gerada pelo felogénio traumático formado após o primeiro descortiçamento, é designada por *cortiça secundeira*. Neste ponto as tensões resultantes do crescimento radial da árvore continuam apreciáveis e a cortiça ainda apresenta numerosas fracturas verticais. Existe ainda uma terceira camada, designada por *cortiça amadia*, cuja extracção se faz ao fim de cerca de 40 – 50 anos de idade do sobreiro. Esta apresenta-se como uma camada de espessura uniforme, com



Figura 1.5: Pranchas de cortiça após a sua extracção do sobreiro.

poucas fracturas e de pequena profundidade. Como o crescimento radial da árvore, que se encontra já numa fase adulta, é menor, as tensões resultantes do engrossamento do tronco não são geralmente suficientes para provocar rotura do tecido. Esta é a cortiça que constitui matéria-prima para a indústria de rolhas.

Existem dois tipos base de aglomerados de cortiça: *aglomerados puros*, em que só intervém cortiça, e *aglomerados compostos*, que incorporam, além de cortiça, um material adesivo. Ambos são constituídos por pedaços de cortiça aglutinados, usando-se no seu fabrico granulados de cortiça virgem e secundeira e desperdícios do fabrico de rolhas e de outros produtos de cortiça amadia [Fortes 04].

1.2.2 Produção de cortiça

O sector da cortiça ocupa uma posição de relevo na economia Portuguesa, estando Portugal na primeira posição a nível mundial em vários domínios industriais associados à cortiça. A área de montado de sobreiro em Portugal representa cerca de 33% da área mundial de montado, o correspondente a uma área superior a 730,000 hectares. Esta representa ainda cerca de 23% da floresta nacional e, deste modo, constitui a espécie florestal dominante no país.

Portugal é actualmente o maior produtor de cortiça, com cerca de 54% da produção mundial correspondente a mais de 185 mil toneladas anuais. De acordo com dados da *United Nations Statistic Division*, Portugal é também o líder mundial na exportação deste material, ocupando o primeiro lugar com 60% da quota mundial. As exportações de cortiça, de facto, constituem uma fonte importante de proveitos para o país, uma vez

que 90% da cortiça transformada em Portugal tem por destino o Mercado Internacional.

As principais actividades produtivas inseridas no sector da cortiça são a Preparadora, a Transformadora, a de Aglomeração e a de Granulação, sendo a Transformadora a que ocupa uma posição de maior relevo em Portugal, que detém a maior capacidade industrial e empresarial do mundo para a transformação da cortiça e exportação dos produtos derivados já transformados. Portugal transforma cerca de 70% da produção mundial, incluindo uma percentagem substancial de cortiça originária de Espanha. Actualmente, o mais forte sector de destino dos produtos de cortiça é a indústria vinícola, representando cerca de 68% de toda a produção de cortiça. Este é seguido pelo sector da construção civil com 15% da cota de mercado e pela indústria automóvel com 7% [RealCork 07].

As aplicações da cortiça vão desde as rolhas a artigos de artesanato, utensílios de cozinha, solas para calçado, isolantes térmicos e acústicos, revestimentos de paredes e tectos, juntas para motores de explosão, queima para produção de energia (pó de cortiça), entre outras [Gouveia 01]. Os materiais que mais directamente competem com a cortiça são, como seria de esperar, outros materiais celulares. Contudo, assiste-se actualmente a inesperadas substituições de materiais em muitas aplicações. Tal significa que poderão abrir-se à cortiça áreas de aplicação inesperadas, como é o caso da utilização deste material como absorvedor de energia de impacto em aplicações de segurança passiva automóvel.

1.2.3 Estrutura da cortiça

Aparentemente, a primeira referência escrita à cortiça é de Plínio, o Velho (d.C. 77), que a descreve nos seguintes termos: *"O sobreiro é uma planta pequena; o único produto útil que origina é a casca, muito espessa, e que, uma vez removida, volta a crescer"*. Cerca de vinte anos depois, Plutarco refere já o emprego da cortiça pelos romanos em barcos, desde o ano 400 a.C.

A cortiça ocupa, de facto, uma posição de relevo na História da Ciência. Quando, em 1664, Robert Hooke aperfeiçoou o seu microscópio, um dos primeiros materiais que observou foi a cortiça. Esta observação levou-o à descoberta da unidade básica das plantas e dos tecidos biológicos, à qual deu a designação de *célula*, palavra derivada do latim *cella* que significa pequeno compartimento. No livro de Robert Hooke, *Micrographia* [Hooke 65], foram publicados os desenhos feitos pelo autor, que reproduzem a estrutura da cortiça (figura 1.6). Hooke detectou a anisotropia da estrutura da cortiça, desenhando as células em duas secções perpendiculares entre si. Na figura 1.6, à esquerda, está representada a secção de uma estrutura composta por células alongadas, dispostas em fiadas contíguas, e à direita, uma estrutura relativamente isotrópica composta por células aproximadamente hexagonais. A estrutura proposta por Hooke veio posteriormente a ser confirmada por outros autores, e é ainda uma descrição simplista da estrutura real da cortiça.

Dada a anisotropia e estrutura celular da cortiça, podem definir-se três direcções principais e três secções principais. As primeiras são designadas de acordo com a orientação em relação ao tronco da árvore. Assim, as direcções segundo o raio e o eixo do tronco designa-se por *radial* e *axial*, respectivamente. A direcção tangente à circunferência do tronco designa-se por *tangencial*. Do mesmo modo se designam as

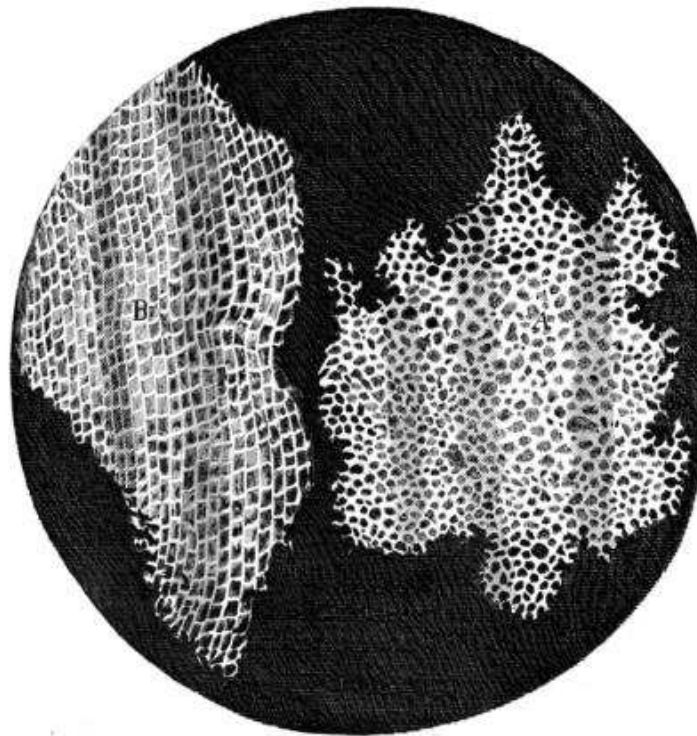


Figura 1.6: Desenhos de Robert Hooke da estrutura da cortiça [Hooke 65].

secções tangencial, transversal e radial, em concordância com a posição das secções relativamente ao tronco.

De uma forma simplificada, as células de cortiça podem ser descritas como prismas, em média hexagonais, empilhados em colunas ou fiadas, cujo eixo tem a direcção radial. Uma das complexidades da estrutura da cortiça reside na irregularidade das paredes segundo esta direcção, geralmente onduladas. As células de uma mesma coluna são geradas, uma após outra, pela mesma célula de felogénio e não existe correlação entre as alturas das células de cortiça em colunas adjacentes. As dimensões das células da cortiça variam bastante, quer de cortiça para cortiça, quer numa mesma prancha de cortiça. De um modo geral, as paredes celulares têm uma altura média de $45\ \mu\text{m}$, um lado de base hexagonal de comprimento aproximadamente igual a $20\ \mu\text{m}$ e uma espessura média de parede celular de $1\ \mu\text{m}$. Nas figuras 1.7 e 1.8 pode observar-se uma fotografia da estrutura celular da cortiça na direcção radial, captada com microscópio electrónico de varrimento, e a representação esquemática de uma célula de cortiça, respectivamente.

As propriedades específicas da cortiça resultam, em grande medida, da densidade relativa e da sua constituição química que é substancialmente diferente da de outros tecidos vegetais. A fracção volúmica de fase sólida da cortiça constitui 15% do volume total do material, sendo as células da cortiça fechadas. O composto principal da parede celular é a *suberina*, um biopolímero de carácter lipídico responsável pela muito baixa permeabilidade da cortiça, que se encontra associado à *lenhina*, um biopolímero de carácter aromático.

De facto, a composição química da cortiça e a estrutura molecular dos seus compo-

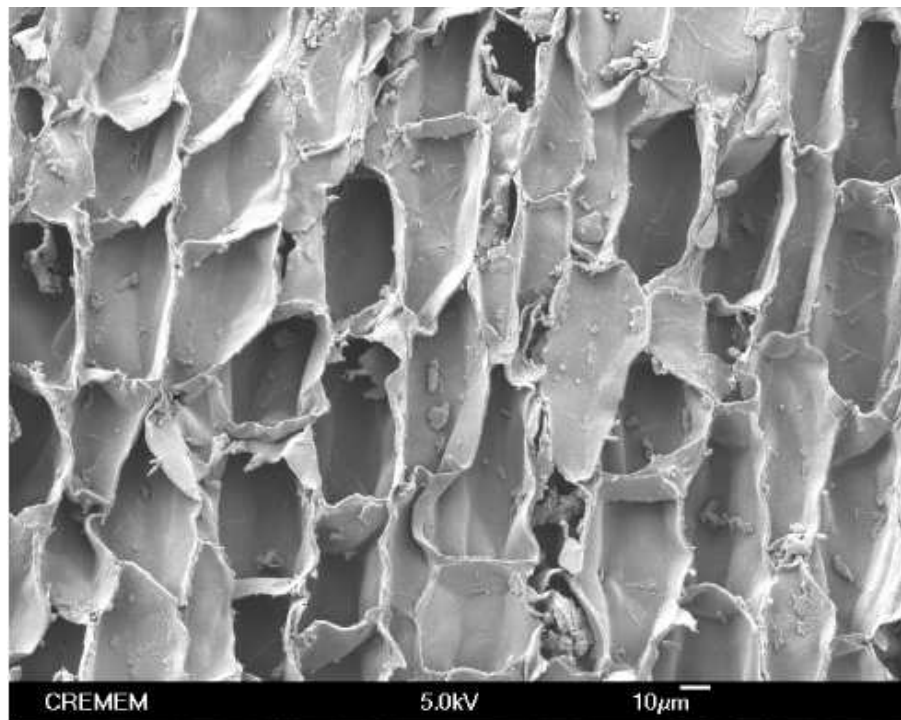


Figura 1.7: Observação com microscópio electrónico de varrimento da estrutura celular da cortiça [Gameiro 07a].

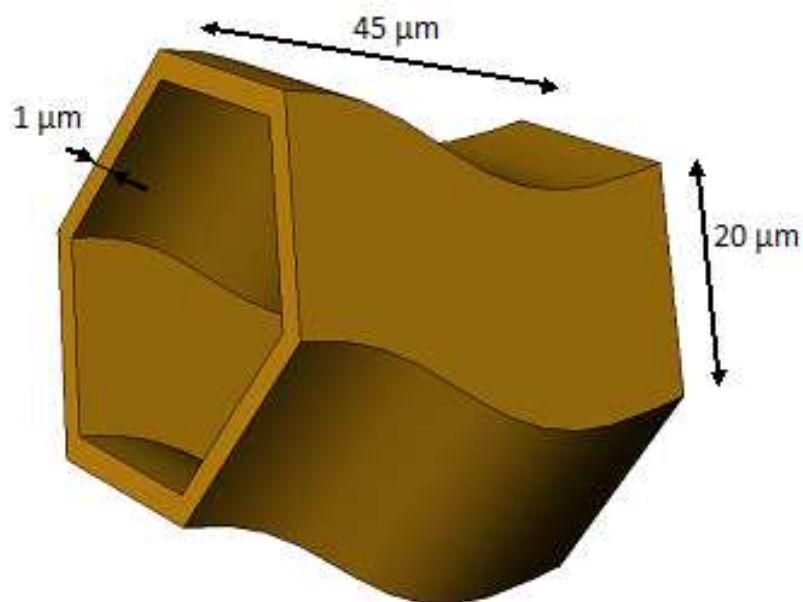


Figura 1.8: Representação esquemática de uma célula de cortiça.

nentes continuam a ser objecto de investigação, sendo muitos aspectos ainda desconhecidos. Por enquanto atribuem-se as características mecânicas da cortiça, em grande medida, ao principal componente das suas paredes celulares, a suberina. O facto de a cortiça ser formada por células fechadas e ricas em suberina permite uma baixa condutibilidade térmica e acústica, uma elevada impermeabilidade e, em parte, elevada resiliência e capacidade de absorção de vibrações. Adicionalmente, a presença de células abertas à superfície explica o elevado coeficiente de atrito.

O facto de a cortiça ser um material celular natural e anisotrópico resulta numa grande variabilidade nos valores de determinadas propriedades, quando medidos em amostras diversas ou mesmo em amostras da mesma prancha. De facto, as próprias dimensões das células variam significativamente com a época sazonal em que se desenvolveu o seu crescimento. Outra dificuldade na caracterização da cortiça prende-se com a existência de canais lenticulares e de defeitos como o *bofe*, o *verde* ou o *enguiado da costa*. Os canais lenticulares, geralmente designados por *poros*, são resultado da existência de pequenas regiões no felogénio onde não há produção de células de cortiça, as *lentículas*. O bofe é uma descontinuidade importante do tecido suberoso, com porosidade muito elevada, consequência da existência de canais com diâmetros elevados. O verde é devido a áreas da cortiça com elevado teor de humidade (400-500%) rodeadas por cortiça com teor de humidade normal (6-8%, quando seca ao ar). Finalmente, o defeito de enguiado da costa consiste na existência de fendas pronunciadas e dirigidas axialmente, na costa das pranchas, que podem estender-se até às primeiras camadas de cortiça subjacentes [Fortes 04, Gameiro 07a].

1.2.4 Estado da arte

O comportamento *quasi*-estático da cortiça tem sido estudado por vários autores. A estrutura da cortiça e a deformação das suas paredes celulares em ensaios de tracção e de compressão foram estudadas em grande detalhe por Gibson *et al.* [Gibson 81]. Estes autores relacionaram valores do módulo de elasticidade e propriedades mecânicas da cortiça, segundo as suas direcções principais (radial, axial e tangencial), obtidas experimentalmente com expressões teóricas baseadas na deformação da estrutura celular do material. Em 1997, Gibson e Ashby [Gibson 97], publicaram no livro *Cellular Solids* a teoria da deformação das paredes de materiais celulares, em particular da cortiça, sob solicitações diversas.

Rosa e Fortes [Rosa 88a] investigaram o efeito da velocidade de deformação no comportamento da cortiça em compressão, considerando a anisotropia do material. Estudaram o comportamento da cortiça para três velocidades de deformação diversas nas três direcções principais. Os mesmos autores estudaram ainda a recuperação de dimensões após compressão, inferindo que a taxa de recuperação diminui significativamente com o tempo e aumenta com o grau de deformação inicial. Noutra publicação, Rosa e Fortes [Rosa 88b] apresentaram um estudo sobre relaxação de tensões e fluência da cortiça sob compressão, também nas três direcções principais. Já no âmbito da análise do comportamento de rolhas de cortiça, realizaram ensaios cíclicos de carga-relaxação-descarga em compressão, nas direcções radial e tangencial.

As propriedades viscoelásticas da cortiça foram posteriormente estudadas por Mano [Mano 02], para uma gama de temperaturas entre -40 e 120°C . No desenvolvimento

deste estudo, o autor determinou os módulos de armazenamento e de perda. No seguimento deste tema, Mano realizou ensaios de fluência em provetes de cortiça sob compressão, a temperaturas entre 0 e 50°C, e avaliou o comportamento em termos de relaxação de tensões [Mano 07].

O atrito da cortiça em contacto com outros materiais e com a própria cortiça foi estudado por Vaz e Fortes [Vaz 98], bem como a relação do coeficiente de atrito do material com a tensão de compressão, velocidade de deslizamento e humidade da amostra. Estes autores obtiveram valores de coeficiente de atrito entre 0.4 e 1.2. Marat-Mendes e Neagu [Marat-Mendes 03] investigaram a relação entre as propriedades eléctricas da cortiça com o teor de humidade do material. Estes autores analisaram ainda o processo de relaxação dieléctrica.

A variabilidade da estrutura e das propriedades da cortiça, associada ao facto de este ser um material natural é, como já foi referido, um dos maiores obstáculos à sua caracterização. Por este motivo, os factores que envolvem e influenciam a variabilidade mencionada são objecto de variados estudos, de forma a averiguar formas de controlo de qualidade química e estrutural da cortiça. Neste âmbito, Costa *et al.* [Costa 03] analisaram a variabilidade do crescimento radial em sobreiros adultos, na zona sudoeste de Portugal. Os autores sugerem que os resultados obtidos neste estudo fornecem dados úteis para a optimização do tempo de ciclo de produção de cortiça, de modo a efectuar a extracção das pranchas de cortiça no momento em que se espera obter o produto com determinadas características, nomeadamente uma determinada espessura. A relação entre o crescimento do sobreiro e as características do solo, do declive e de escoamento de montados na zona sudeste de Portugal, foi analisada por Costa *et al.* [Costa 08].

A caracterização do comportamento mecânico da cortiça quando sujeita a solicitações variadas requer um conhecimento relativamente profundo dos mecanismos de deformação das células deste material. Estes mecanismos foram estudados por Pereira *et al.* [Pereira 87] e por Pina e Fortes [Pina 96]. A influência dos mecanismos de crescimento das células de cortiça no sobreiro sobre as propriedades mecânicas desta foi estudada por Perereira *et al.* [Pereira 92] e por Fortes e Rosa [Fortes 92]. Estes autores observaram tensões tangenciais de tracção crescentes e tensões radiais de compressão decrescentes com o aumento da distância ao eixo do sobreiro. Analisaram ainda algumas consequências das tensões de crescimento como as ondulações das paredes celulares, a variação de espessura dos anéis de crescimento e a existência de fendas nas camadas exteriores da cortiça.

A influência do gás presente no interior das células da cortiça sobre as propriedades mecânicas foi estudada por Fortes e Rosa [Fortes 87], que afirmaram que a contribuição do gás se podia desprezar para níveis de deformação inferiores a 70%. Mais tarde, os mesmos autores averiguaram os mecanismos de fractura da cortiça e estudaram as propriedades relacionadas com a deformação e fractura do material, quando solicitado à tracção [Rosa 91]. Rosa e Fortes, estudaram, ainda, os parâmetros que regem a absorção de água pela cortiça e os seus efeitos no comportamento mecânico do material, tendo em conta a anisotropia da cortiça [Rosa 93]. Este tema foi também abordado por Gil *et al.* [Gil 00]. Fortes e Nogueira realizaram uma análise pormenorizada dos mecanismos de deformação da cortiça e estudaram o efeito de Poisson [Fortes 89].

Gil observou aglomerados puros de cortiça através de microscopia electrónica, antes e após densificação do material, para diferentes tipos de densificação. O autor analisou

ainda, a relação entre a distância média das paredes celulares e a compressão aplicada, bem como a influência dos tratamentos de densificação na composição química do aglomerado [Gil 94, Gil 96]. Teixeira *et al.* [Teixeira 96] estudaram a influência da molhabilidade de alguns adesivos utilizados no fabrico de cortiça aglomerada sobre o comportamento mecânico de aglomerados compostos de cortiça. O comportamento mecânico à compressão, o comportamento à flexão em três pontos e a estrutura microscópica dos aglomerados foram também estudados pelo mesmo autor. Gómez-Serrano *et al.* [Gómez-Serrano 03] realizaram um estudo sobre a densidade de aglomerados puros e compostos fabricados a partir de desperdícios de cortiça. Analisaram ainda o efeito do tamanho das partículas de cortiça e do teor de resina na densidade aparente dos aglomerados.

Nóvoa *et al.* [Nóvoa 04] investigaram o comportamento mecânico de uma argamassa polimérica modificada com granulados de cortiça. Estes autores realizaram ensaios de compressão e de flexão até ruptura com diferentes argamassas, com teores volúmicos de cortiça entre 0 e 45%. Por fim, estudaram a influência da fracção volúmica de cortiça e a fracção mássica de resina/areia no comportamento mecânico das argamassas poliméricas modificadas com cortiça.

Os estudos realizados sobre a cortiça concentram-se maioritariamente no comportamento mecânico *quasi*-estático. Grande parte dos estudos foram motivados pelo tipo de carregamentos a que está sujeita uma rolha de cortiça dentro do gargalo de uma garrafa, tendo sempre em vista uma melhoria da qualidade e do desempenho deste material para a indústria rolheira. São exemplo disso os estudos sobre a viscoelasticidade, a fluência e a relaxação de tensões; as publicações sobre o coeficiente de Poisson, a influência da humidade e porosidade no material; os avanços nos mecanismos de crescimento e fractura da cortiça com o intuito de conhecer os parâmetros que afectam directamente a qualidade das pranchas de cortiça, *etc.* Os estudos sobre atrito, amortecimento de vibrações e isolamento acústico têm sido em grande parte motivados pelo mercado centrado no uso de painéis de aglomerado para a construção civil [Gameiro 07a].

Em 2004 foi publicado o primeiro livro científico sobre a cortiça, *A Cortiça*, escrito por Fortes *et al.* [Fortes 04]. Este livro divulga os conhecimentos científicos nesta área obtidos até à data da sua publicação, de uma forma rigorosa. Mais recentemente, a autora Helena Pereira escreveu um livro no mesmo âmbito, *Cork: Biology, Production and Uses* [Pereira 07]. Estes livros incluem informação sobre a formação e crescimento da cortiça; a sua estrutura e composição química; a qualidade da cortiça; propriedades físicas como a densidade, a resistência ao desgaste e as propriedades térmicas, eléctricas, viscoelásticas e acústicas; as propriedades e o comportamento mecânico à compressão, tracção, fractura e torsão; os produtos quer de cortiça natural, quer de cortiça aglomerada; entre outras.

Recentemente, alguns autores estudaram a cortiça quando sujeita a solicitações de impacto e a utilização deste material em sistemas de absorção de energia. Gameiro *et al.* realizaram estudos experimentais e numéricos sobre o comportamento dinâmico de diferentes tipos de cortiça quando solicitada em compressão, a diferentes taxas de deformação. Adicionalmente, de forma a estudar a utilização da cortiça como material de absorção de energia de impacto em componentes estruturais, os autores testaram, para diferentes velocidades de deformação, o comportamento de tubos de

alumínio de secção circular e quadrangular com e sem cortiça confinada. Os resultados obtidos numericamente com o programa LS-DynaTM, através do método dos elementos finitos, mostraram estar em razoável conformidade com os resultados obtidos experimentalmente. Finalmente, os resultados obtidos com cortiça confinada, em termos de capacidade de absorção de energia, mostraram-se bastante satisfatórios e mostraram que a utilização deste material neste âmbito apresenta grande potencialidade [Gameiro 05, Gameiro 07c]. No seguimento deste estudo Gameiro e Cirne [Gameiro 07b] estudaram as características de tensão-deformação, a capacidade de absorção de energia e as transições entre modos de colapso para tubos circulares com e sem cortiça confinada, fazendo variar as dimensões do diâmetro, da espessura e do comprimento do tubo. Ainda no mesmo âmbito, Gameiro *et al.* [Gameiro 07d] realizaram simulações numéricas em LS-DynaTM de situações de impacto uniaxial a 10 e a 15 m/s em tubos de secção circular e quadrangular, com e sem cortiça confinada. Os autores concluíram que o confinamento de cortiça, em ambas as geometrias analisadas, leva a um aumento significativo da capacidade de absorção de energia da estrutura. Concluíram, ainda, que a espessura do tubo influencia quer os modos de deformação quer a absorção de energia.

O conteúdo deste trabalho resulta de uma apreciação positiva da cortiça como material destinado a absorção de energia de impacto, inferida pelos autores dos estudos referidos no parágrafo anterior. De facto, a cortiça é um material celular natural com características favoráveis no âmbito da segurança passiva. Destacam-se, além da capacidade de absorção de energia de impacto, a baixa densidade, boa estabilidade química e resiliência, impermeabilidade a líquidos e resistência ao fogo e ao desgaste. A cortiça é ainda um material reciclável e reutilizável, ecológico, higiénico, de fácil manutenção e com elevada durabilidade. Poderá esperar-se, portanto, que este material seja capaz de satisfazer exigências em todas as vertentes do sector automóvel como, por exemplo, as exigências ambientais, económicas, de desempenho e de *crashworthiness*.

Capítulo 2

Objectivos

Com este trabalho pretende-se estudar e desenvolver componentes estruturais projectados para aumentar a segurança passiva em caso de impacto, com aplicação específica no sector automóvel. A vertente inovadora da investigação que se propõe neste trabalho prende-se com a análise da viabilidade da incorporação, nesses componentes, de cortiça. De uma forma genérica, o objectivo deste trabalho consiste no estudo do comportamento mecânico de componentes estruturais para protecção contra impacto lateral entre dois veículos. Estes componentes são utilizados como absorvedores de energia e têm como principal função aumentar a segurança passiva do veículo, através da redução de perigo de lesão para os ocupantes do mesmo. Mais especificamente, pretende-se construir um sistema que ofereça maior protecção à zona pélvica do ocupante. Para tal, são efectuados estudos numéricos sobre alguns materiais celulares, considerando quer a função destes componentes quer os requisitos técnicos de projecto impostos pela indústria automóvel. Assim, de uma forma estruturada, os objectivos do trabalho aqui proposto são os seguintes:

- Estudar o comportamento ao impacto de baixa velocidade de um conjunto diversificado de materiais já utilizados em aplicações concretas para absorção de energia;
- Avaliar a resposta dinâmica da cortiça micro-aglomerada em confronto com outros materiais celulares utilizados na actualidade dedicados a aplicações de absorção de energia;
- Avaliar os benefícios da utilização de micro-aglomerado de cortiça em aplicações concretas de segurança passiva, nomeadamente no caso de impacto lateral, através da introdução deste material em componentes estruturais. Neste ponto deverão estudar-se situações de solicitação correspondentes ao choque lateral de baixa velocidade entre veículos;
- Desenvolver e propôr um sistema concreto para protecção de ocupantes em situações de impacto lateral em veículos automóveis, incorporando cortiça.

Capítulo 3

Guia de Leitura

Esta dissertação é composta por nove capítulos. Abaixo são descritos resumidamente os conteúdos de cada capítulo, de forma a fornecer ao leitor um guia de leitura prático.

Capítulos 1, 2 e 3 - Enquadramento e Objectivos

Nesta primeira parte apresentam-se os tópicos envolvidos e tratados durante o desenvolvimento da dissertação, explicam-se conceitos relativos à proteção contra impacto, *crashworthiness* e absorção de energia. Referem-se alguns materiais tipicamente utilizados em situações de impacto e descreve-se mais especificamente a cortiça e as suas potencialidades. É incluída a revisão bibliográfica referente a investigações realizadas que se contestualizem neste projecto. Nos capítulos 2 e 3 expõem-se os objectivos desta dissertação e constrói-se um breve guia dedicado ao leitor.

Os capítulos seguintes são dedicados à caracterização de diferentes materiais celulares destinados à absorção de energia de impacto, e avaliação do seu desempenho do ponto de vista de segurança passiva automóvel.

Capítulo 4 - Procedimentos e Métodos

Neste capítulo são descritos os procedimentos e métodos utilizados na caracterização do comportamento mecânico de alguns materiais celulares no âmbito deste trabalho. Realizaram-se simulações numéricas em LS-DynaTM com espuma de Alumínio, de forma a determinar as condições ideais para realização de simulações para caracterização de materiais em situação de impacto. É ainda feita a caracterização do comportamento mecânico IMPAXXTM300.

Capítulo 5 - Ensaaios de Caracterização

Nesta secção realizam-se simulações numéricas em LS-DynaTM a fim de caracterizar o comportamento mecânico dos materiais utilizados em caso de impacto, e confrontá-los no mesmo âmbito. As simulações são realizadas de acordo com especificações pré-definidas, isto é, realizam-se simulações numéricas para diferentes valores de energia

cinética inicial da parede móvel, fazendo variar unicamente a massa da mesma.

Capítulo 6 - Resultados e Discussão

Nesta secção do trabalho os resultados obtidos através da realização de simulações numéricas para os diferentes materiais utilizados, são confrontados e discutidos. Serão considerados os factores relevantes em termos de absorção de energia de impacto em situações de colisão automóvel, nomeadamente a absorção de energia, o pico de aceleração e a intrusão no habitáculo do ocupante.

Os posteriores capítulos são inerentes à incorporação de cortiça em componentes estruturais para protecção lateral, nomeadamente, nas portas laterais do automóvel.

Capítulo 7 - Modelação do Ensaio

Neste capítulo desenvolve-se um sistema concreto de protecção contra impacto lateral em veículos automóveis, através da inclusão de *padding*s de cortiça micro-aglomerada nas portas laterais. Descreve-se o modelo utilizado para a realização de simulações numéricas de impacto lateral, em LS-DynaTM, e explicam-se os métodos utilizados no processo de simplificação do modelo.

Capítulo 8 - Resultados e Discussão

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos nas simulações numéricas, realizadas em LS-DynaTM, de impacto lateral com e sem um *padding* de cortiça micro-aglomerada confinado no interior da porta lateral do automóvel. Os resultados de interesse no âmbito da segurança passiva – pico de aceleração, intrusão da porta no habitáculo e energia absorvida pela estrutura – são confrontados e avaliam-se as diferenças e os benefícios da implementação de um *padding* de cortiça.

A terceira parte deste trabalho consite, unicamente, nas conclusões e discussões gerais de todo o desenvolvimento.

Capítulo 9 - Discussão e Conclusões

Neste capítulo apresentam-se as conclusões gerais e discutem-se os resultados obtidos na realização deste trabalho.

Parte II

Caracterização Mecânica dos Materiais

Capítulo 4

Procedimentos e Métodos

Neste capítulo são descritos os procedimentos e métodos utilizados na caracterização do comportamento mecânico de alguns materiais celulares no âmbito deste trabalho. Realizaram-se simulações numéricas em LS-DynaTM com espuma de Alumínio, de forma a determinar as condições ideais para realização de simulações para caracterização de materiais em situação de impacto. É ainda feita a caracterização do comportamento mecânico do IMPAXXTM300.

4.1 Configuração dos ensaios numéricos

Para analisar a eficácia e a viabilidade da utilização de micro-aglomerado de cortiça como material para absorção de impacto, em situações de colisão automóvel, é primeiro necessário averiguar se este material apresenta vantagens significativas em relação aos materiais já existentes e utilizados para este fim. Para o efeito, foram seleccionados três materiais celulares com características e comportamento distintos: duas espumas poliméricas – espuma de poliuretano rígida e IMPAXXTM300 – e uma espuma metálica – espuma de Alumínio. Realizaram-se ensaios numéricos com o programa LS-DynaTM com os quatros materiais em condições de impacto idênticas.

Na configuração das simulações utilizou-se um bloco paralelepipedico de cada um dos materiais, com dimensões $100 \times 200 \times 300$ [mm³] com uma face apoiada sobre uma parede rígida fixa. Uma parede rígida móvel embate na face oposta do bloco, como representado esquematicamente na figura 4.1. À parede móvel atribuiu-se uma velocidade inicial v_0 e uma massa determinada. Em todos os ensaios realizados, a velocidade inicial é $v_0 = 13.89$ m/s, em conformidade com os protocolos utilizados pela entidade *European New Car Assessment Programme* (Euro NCAP) para *crash tests* de colisão lateral [NCAP 04]. Consequentemente, a massa m é determinada em função da energia cinética inicial pretendida para a simulação em questão e resulta da seguinte relação:

$$m = \frac{2E_{ci}}{v_0^2}, \quad (4.1)$$

em que E_{ci} é a energia cinética inicial do choque e v_0 é a velocidade inicial da parede móvel.

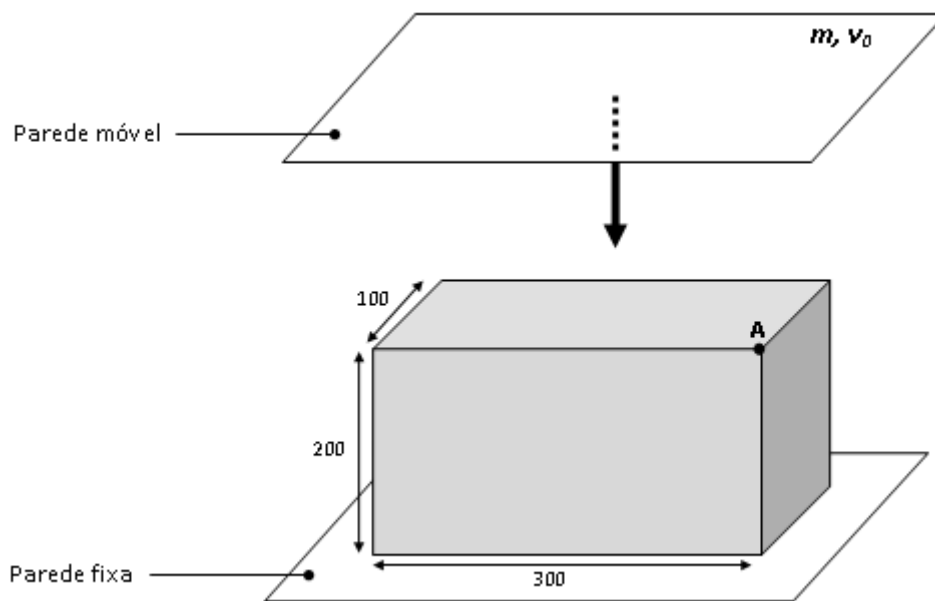


Figura 4.1: Representação esquemática da configuração dos ensaios numéricos realizados para comparação do comportamento mecânico de alguns materiais celulares. Localização do ponto de referência A, utilizado para análise de resultados.

Para que seja possível determinar as potencialidades de cada material individualmente, além de se fazer uma comparação metódica do comportamento dos materiais em condições semelhantes, procurou-se determinar os valores máximos de energia que cada bloco (cada material) consegue absorver.

Devido à elevada quantidade de ensaios realizados ao longo de todo este trabalho, foi necessário recorrer a referências alfanuméricas para os designar, em concordância com a configuração de cada um. As referências iniciam-se sempre por três letras maiúsculas referentes ao material utilizado, de acordo com a tabela 4.1. Assim, cada ensaio de simulação numérica realizado será designado por uma sigla alfanumérica definida do seguinte modo:

$$\text{MMEE} - \text{DDFF},$$

em que MMM é a sigla referente ao material em estudo (ver tabela 4.1), EE representa a energia cinética inicial do processo dinâmico simulado, em kJ, e DD diz respeito a quaisquer algarismos necessários para desambiguação. Finalmente, FF é constituído por duas letras que definem a fase de estudo em que o ensaio ocorre. A título de exemplo, a referência ALF05–100MO designa um ensaio realizado sobre um bloco de espuma de Alumínio, para uma energia cinética inicial da parede móvel $E_{ci} = 5$ kJ, realizado durante a fase de Optimização da Malha (MO¹) com uma malha de elementos finitos de dimensão média de 100 mm.

¹ Do inglês *Mesh Optimization*.

Tabela 4.1: Materiais utilizados na caracterização do comportamento mecânico ao impacto e respectivas siglas.

Material	Sigla
Micro-Aglomerado de Cortiça	MAC
Espuma de Poliuretano	PUF
Espuma de Alumínio	ALF
IMPAXX TM	IMP

4.1.1 Modelação em LS-DynaTM

A implementação e configuração dos ensaios de simulação numérica é realizada no programa de pré-processamento ETA FembTM, associado ao LS-DynaTM. É neste programa que se define a geometria do problema, a sua configuração, condições de fronteira e todos os parâmetros de modelação do ensaio numérico.

As paredes rígidas fixa e móvel são definidas como modelos de contacto. O modelo aplicado à parede rígida fixa é um contacto do tipo `*RIGIDWALL_PLANAR`. Para a parede móvel recorreu-se ao modelo `*RIGIDWALL_PLANAR_MOVING`. Estes modelos permitem, de um modo simples, tratar o contacto entre duas superfícies que interagem de algum modo. Em ambas as situações tratam-se de paredes rígidas de dimensão infinita em contacto com os nós do corpo deformável com que interagem, designados por nós escravos². No caso da parede móvel é ainda necessário definir a velocidade inicial, direcção do movimento e massa da parede.

O modelo de comportamento utilizado em todos os materiais testados nesta parte do trabalho é o modelo `*MAT_HONEYCOMB`. A utilização do mesmo modelo para todos os materiais prende-se com o facto de ser um modelo dedicado a materiais do tipo *honeycomb* e materiais celulares em geral, com comportamento anisotrópico. Este modelo considera que o coeficiente de Poisson do material é nulo e os parâmetros que é necessário definir são: a densidade, o módulo de elasticidade e a curva de comportamento tensão-deformação do material celular. Adicionalmente, é ainda necessário definir o módulo de elasticidade, a tensão de cedência e o coeficiente de Poisson do material compacto (denso). Para este modelo, o módulo de elasticidade varia desde o seu valor inicial até ao valor do material totalmente compactado. Considera-se que esta variação é linear com o volume relativo³.

Para a discretização do corpo deformável em elementos finitos escolheram-se elementos sólidos hexaédricos de oito nós, com três graus de liberdade por nó e oito pontos de integração. Na figura 4.2, pode observar-se a representação esquemática e genérica do elemento finito sólido hexaédrico utilizado. A utilização de um elemento totalmente integrado, como este, aumenta o tempo de cálculo numérico mas permite evitar o aparecimento de modos de deformação do tipo *hourglass* (modos de energia nula), levando a uma maior confiança nos resultados obtidos [Hallquist 98, Gameiro 07a].

O critério utilizado para determinação da máxima energia de impacto que cada bloco de material suporta foi o evento que se dá quando um material celular é sujeito a deformações demasiado elevadas e o elemento assume uma geometria irreal, dando origem a volumes irreais negativos.

² Em inglês *slave nodes*.

³ Relação entre o volume actual do material e o seu volume inicial [Hallquist 98].

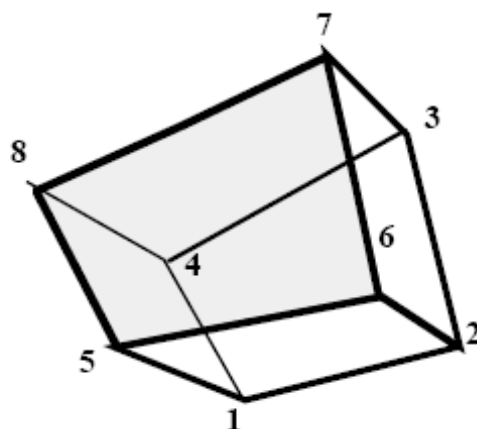


Figura 4.2: Representação esquemática do elemento finito sólido hexaédrico com oito nós utilizado para a caracterização do comportamento dos materiais [Hallquist 98].

Ainda na fase de pré-processamento, é necessário definir os parâmetros de saída (resultados) que se pretendem obter. Para a fase de pós-processamento, ou seja, de processamento de resultados, utilizaram-se os programas LS-PrePostTM e ETA PostGLTM. Para alguns parâmetros obtiveram-se os dados relativos a um nó de referência comum a todas as simulações, situado num dos vértices da parte superior do bloco (ponto A na figura 4.1).

4.2 Espuma de Alumínio

Recentemente, tem-se assistido a um crescente interesse na utilização de espumas metálicas para aplicações nas indústrias automóvel e aeroespacial, entre outras, em que a redução de peso, o conforto e a absorção de energia de impacto são fundamentais. Na figura 4.3 está representado um exemplo de uma espuma de Alumínio.

As espumas de Alumínio (ou de outras ligas metálicas leves) apresentam uma combinação de propriedades muito interessantes como, por exemplo, baixa densidade, elevada rigidez específica, resistência e capacidade de absorção de energia. Estas propriedades tornam estes materiais celulares ideais para aplicação no desenvolvimento de sistemas de segurança passiva automóvel. A sua microestrutura celular oferece-lhes a capacidade de suportar grandes deformações com níveis de tensão quase constantes (patamar) e por isso são materiais com forte aplicação em sistemas de absorção de energia de impacto. Por outro lado, a sua composição metálica fornece características de rigidez e resistência específicas elevadas.

De entre as inúmeras aplicações das espumas de Alumínio na indústria automóvel destacam-se as barras protectoras frontais e laterais, os reforços da carroçaria, os tectos de abrir, os *capots*, etc.

Os dados relativos às propriedades e comportamento mecânico da espuma de Alumínio utilizada no âmbito deste trabalho foram recolhidos na literatura e dizem respeito a uma espuma de Alumínio de célula fechada, produzida através de pulverometalurgia. Este processo produtivo confere à espuma uma elevada rigidez específica e um comportamento à compressão não-linear único [Gama 01, Mines 04]. As propriedades



Figura 4.3: Exemplos de espuma de Alumínio.

mecânicas deste material estão descritas na tabela 4.2. A curva de comportamento à compressão $\sigma - \varepsilon$ é representada no gráfico da figura 4.4. Este modelo constitutivo pode ser definido analiticamente, por partes, de acordo com a seguinte formulação [Mines 04]:

$$\sigma = \begin{cases} 0.177 \times 10^6 \varepsilon & \text{se } \varepsilon \geq 0.03 \\ 5 \times 10^6 + \frac{0.35 \times 10^6 (\varepsilon - 0.03)}{0.711 - \varepsilon} & \text{se } \varepsilon < 0.03 \end{cases} \quad (4.2)$$

Tabela 4.2: Propriedades mecânicas da espuma de Alumínio utilizada na caracterização dos materiais.

Propriedades Mecânicas	ρ [kg/m ³]	E [GPa]	σ_y [MPa]	ν
Material Expandido	470	0.117	–	–
Material Denso	–	69.0	241	0.285

4.2.1 Selecção da malha de elementos finitos

Para maximizar o grau de confiança nos resultados numéricos obtidos procede-se à optimização das condições de ensaio. No que diz respeito à caracterização do comportamento dos materiais, e uma vez que o modelo geométrico é simples, o processo consiste unicamente na optimização da malha, isto é, da dimensão l dos respectivos elementos finitos. Com este procedimento pretende-se seleccionar, de entre malhas gradualmente refinadas, aquela que permite obter resultados mais precisos, sem que seja necessário recorrer a tempos de processamento computacional excessivos. Assim,

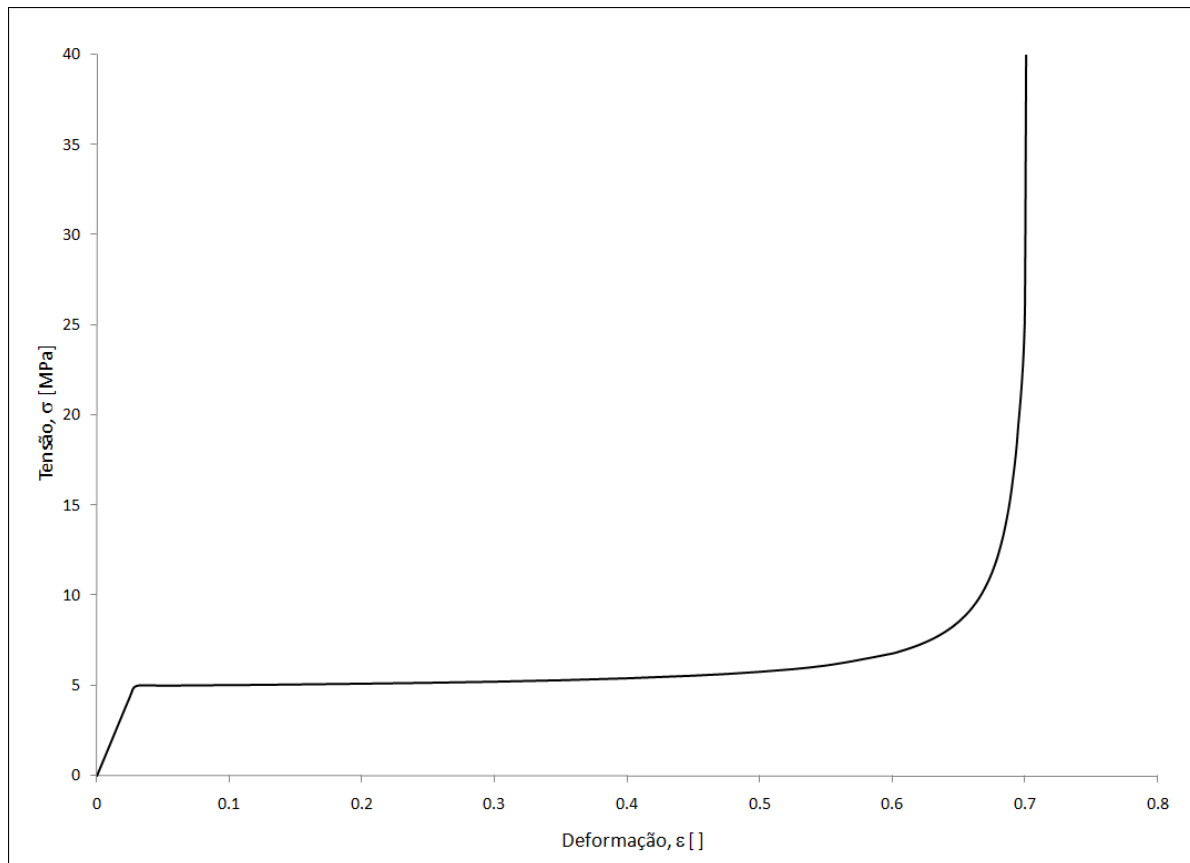


Figura 4.4: Curva de comportamento à compressão da espuma de Alumínio. Para facilitar a visualização, a escala de tensão foi truncada, sendo o valor máximo $\sigma = 240$ MPa, correspondente a uma deformação $\varepsilon = 0.71$.

pretende-se seleccionar uma malha refinada, isto é, cujos elementos tenham dimensões reduzidas, mas não demasiado, já que tal resultaria quer num processo de computação moroso, e consequentemente dispendioso, quer em erros de cálculo significativos, dada a maior quantidade de cálculos necessários à resolução do problema. Para este efeito, realizaram-se simulações numéricas com a configuração descrita na Secção 4.1, utilizando um bloco de espuma de Alumínio, para dois valores distintos de energia cinética inicial, $E_{ci} = 5$ kJ e $E_{ci} = 10$ kJ. A dimensão dos elementos finitos utilizada é a que se indica na tabela 4.3. A referência alfanumérica utilizada para referenciar as simulações individualmente está de acordo com a especificada na Secção 4.1. Os algarismos e letras na parte final da referência correspondem à dimensão dos elementos da malha em milímetros e à fase do trabalho em que são realizadas, Optimização da Malha (MO).

Para análise dos resultados obtidos utilizaram-se, como referência, os resultados da variação da tensão de von Mises com o tempo, num ponto crítico, comum a todos os ensaios. Escolheu-se, para tal, o ponto situado num dos vértices da parte superior do bloco (ponto A da figura 4.1), na face em que se dá o impacto com a parede móvel. O objectivo é comparar os valores obtidos em cada simulação e averiguar a convergência destes consoante o refinamento da malha. A variação da tensão de von Mises com o tempo pode ser visualizada nos gráficos das figuras 4.5 e 4.6.

Para efeitos de comparação utilizaram-se os valores máximos da tensão que, além de serem de grande interesse no âmbito deste trabalho, são os valores que maior discrepância apresentam entre ensaios. A dispersão dos valores da tensão máxima de von

Tabela 4.3: Referências e características dos ensaios numéricos realizados para otimização da malha.

Referência	Massa [kg]	E_{ci} [kJ]	l [mm]	Nº de Elementos	Nº de Nós	DOF
ALF05 – 100MO	51.830	5	100	6	24	72
ALF10 – 100MO	103.663	10				
ALF05 – 050MO	51.830	5	50	48	105	315
ALF10 – 050MO	103.663	10				
ALF05 – 033MO	51.830	5	33	162	280	840
ALF10 – 033MO	103.663	10				
ALF05 – 020MO	51.830	5	20	750	1056	3168
ALF10 – 020MO	103.663	10				
ALF05 – 016MO	51.830	5	16	1296	1729	5187
ALF10 – 016MO	103.663	10				
ALF05 – 010MO	51.830	5	10	6000	7161	21483
ALF10 – 010MO	103.663	10				
ALF05 – 005MO	51.830	5	5	48000	52521	157563
ALF10 – 005MO	103.663	10				

Mises para as diferentes malhas aplicadas pode observar-se nos gráficos das figuras 4.7 e 4.8.

Para comparação dos resultados obtidos determinou-se a diferença relativa, δ , dos valores de tensão obtidos para as n malhas, de acordo com a expressão

$$\delta = \left| \frac{\sigma_n^{\text{máx}} - \sigma_{n+1}^{\text{máx}}}{\sigma_n^{\text{máx}}} \right| \times 100. \quad (4.3)$$

Na expressão anterior $\sigma^{\text{máx}}$ é o valor máximo de tensão equivalente de von Mises. Os resultados obtidos são os indicados na tabela 4.4.

Pode observar-se, através da análise dos valores da tabela 4.4 que, em ambas as séries de simulações, os valores de tensão máxima de von Mises convergem razoavelmente a partir da malha de elementos finitos com dimensão $l = 16$ mm. Verifica-se ainda que, quando consideradas as duas séries, a malha com $l = 10$ mm é a que resulta numa melhor aproximação em termos de resultados obtidos para malhas consecutivas. Consequentemente, a malha eleita para realizar todos os restantes ensaios numéricos é a malha com $l = 10$ mm, elementos de 10 mm, já que mostrou ser, em ambas as séries, a malha que melhor aproximação fornece ($\delta < 1\%$). As malhas testadas estão representadas na figura 4.9.

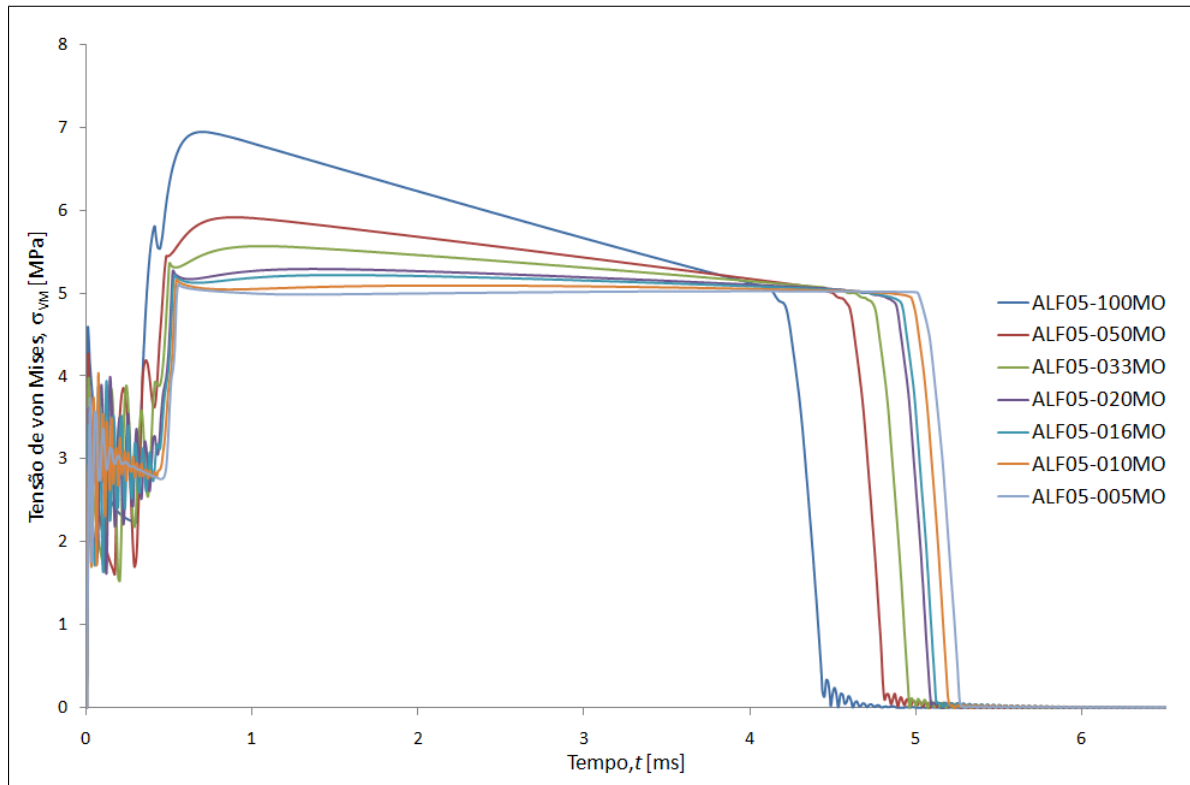


Figura 4.5: Variação da tensão equivalente de von Mises com o tempo ($E_{ci} = 5$ kJ). Ensaios numéricos de otimização de malha de elementos finitos.

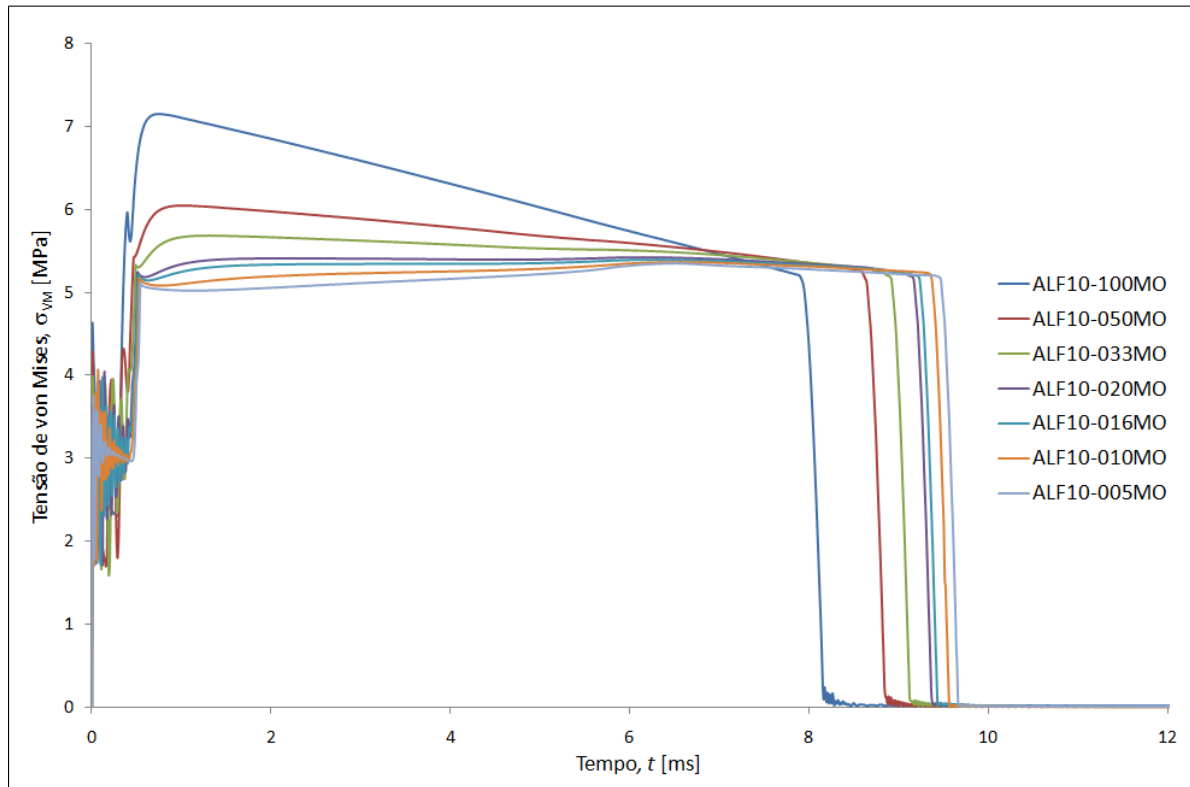


Figura 4.6: Variação da tensão equivalente de von Mises com o tempo ($E_{ci} = 10$ kJ). Ensaios numéricos de otimização de malha de elementos finitos.

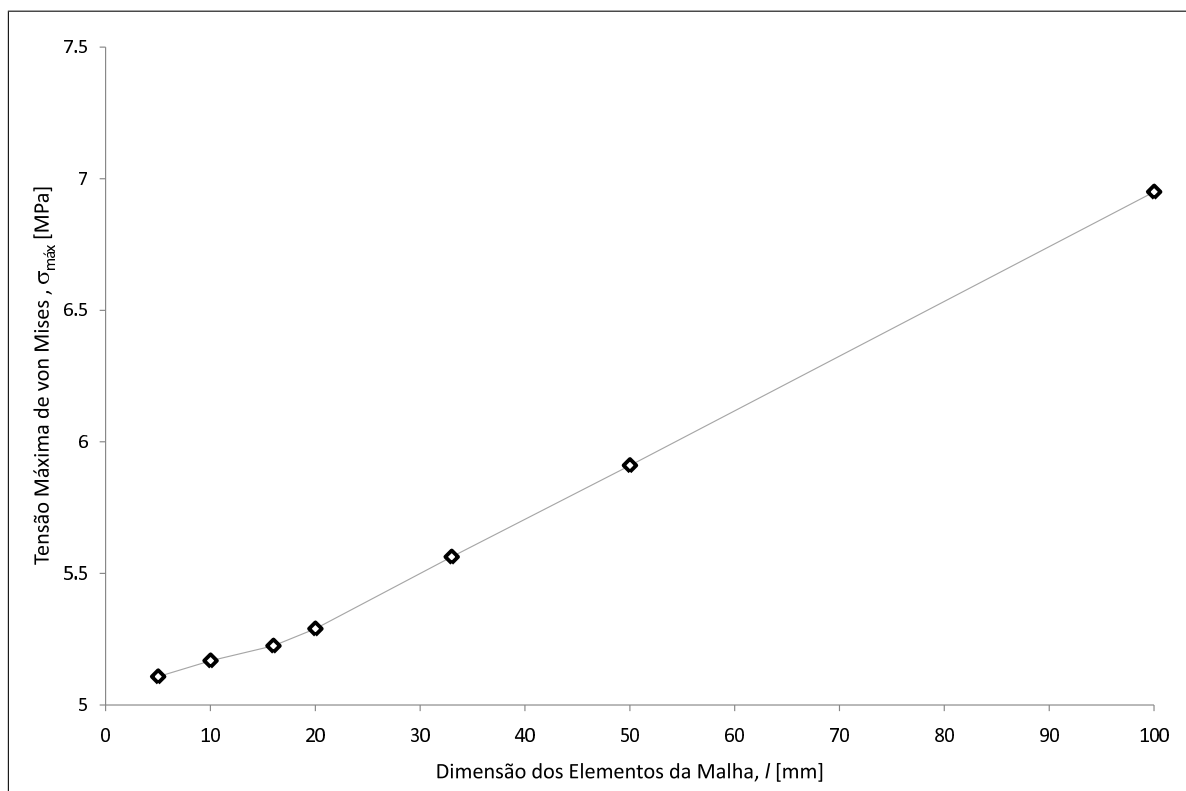


Figura 4.7: Dispersão dos valores da tensão máxima de von Mises com a configuração da malha ($E_{ci} = 5$ kJ).

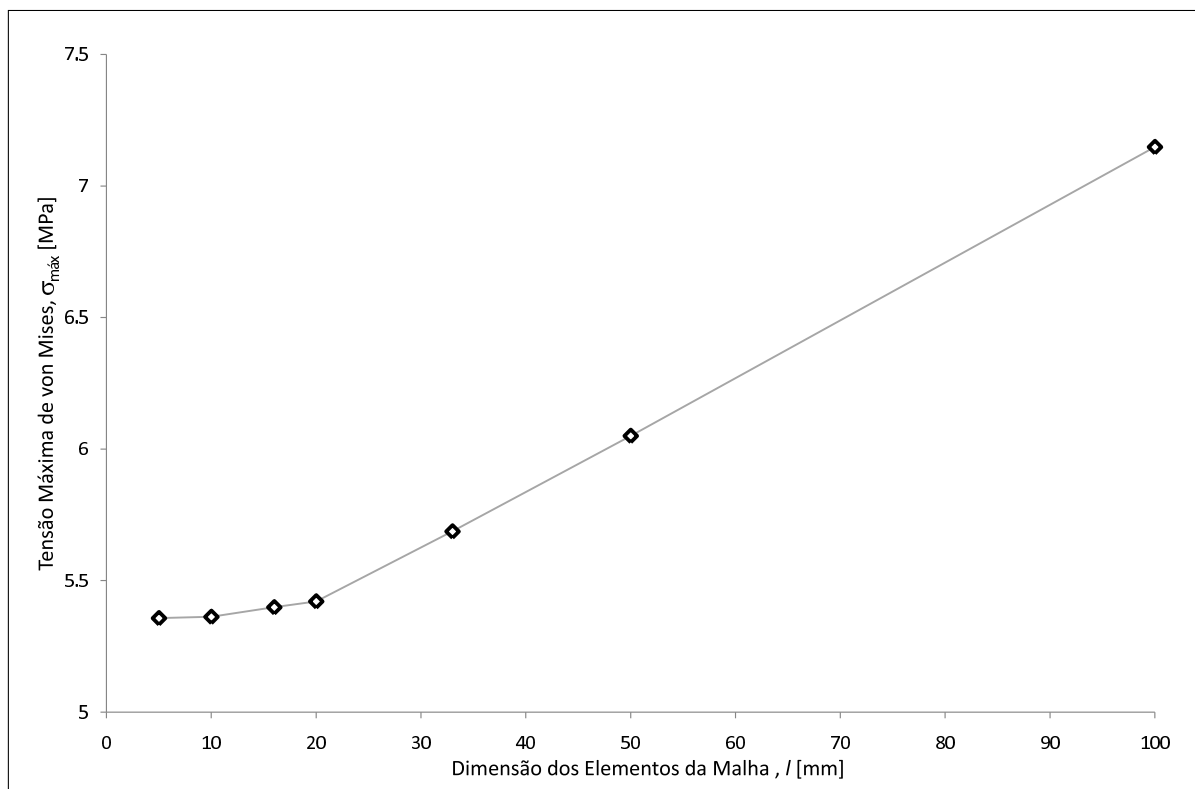


Figura 4.8: Dispersão dos valores da tensão máxima de von Mises com a configuração da malha ($E_{ci} = 10$ kJ).

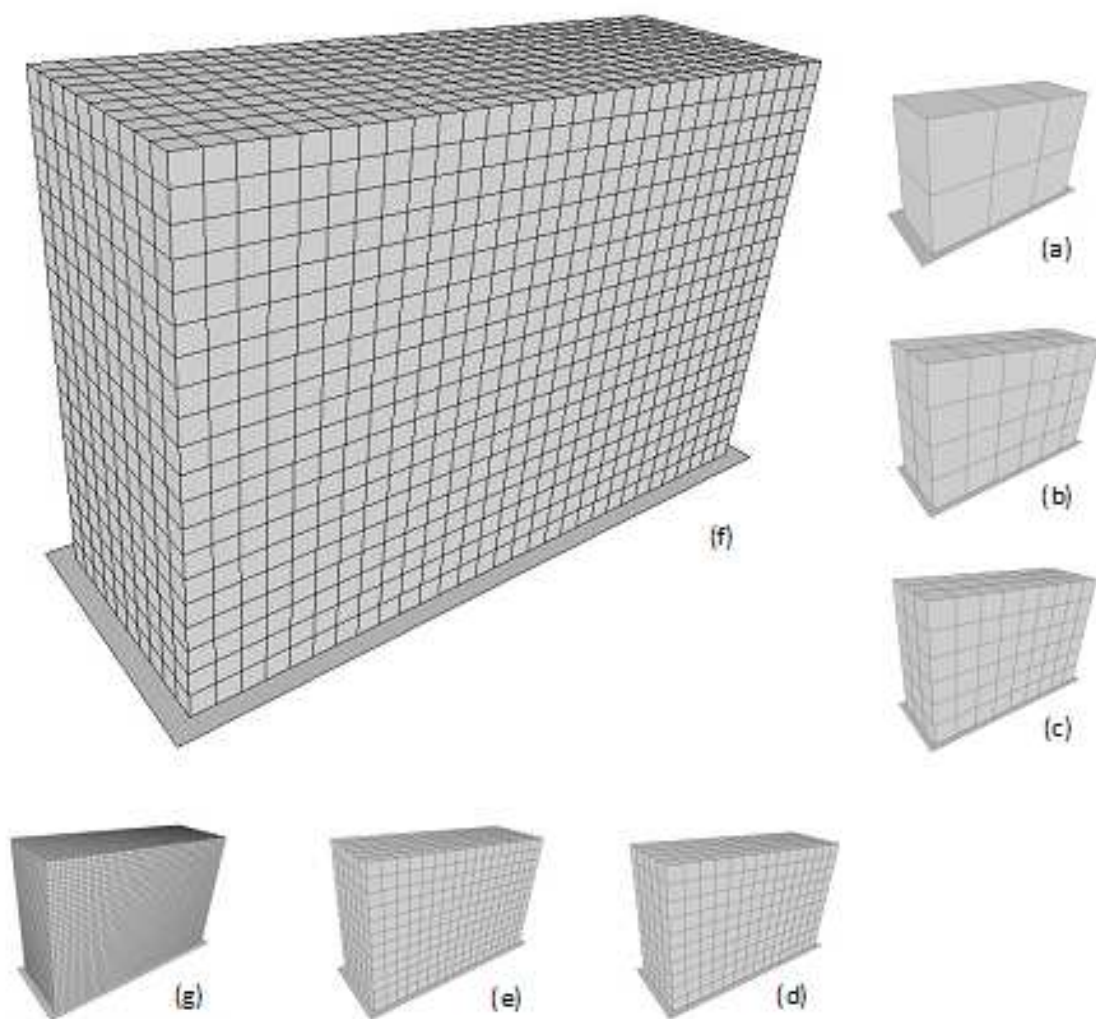


Figura 4.9: Ilustração das malhas testadas durante a fase de otimização da malha de elementos finitos. Malhas de elementos finitos com: (a) $l = 100$ mm, (b) $l = 50$ mm, (c) $l = 33$ mm, (d) $l = 20$ mm, (e) $l = 16$ mm, (f) $l = 10$ mm e (g) $l = 5$ mm.

Tabela 4.4: Valores máximos de tensão de von Mises e diferenças relativas no processo de optimização da malha.

Malha	E_{ci} [kJ]	$\sigma^{\text{máx}}$ [MPa]	δ [%]
100	5	6.950	–
	10	7.148	–
50	5	5.910	17.591
	10	6.050	18.144
33	5	5.563	6.251
	10	5.687	6.386
20	5	5.289	5.165
	10	5.421	4.905
16	5	5.224	1.244
	10	5.399	0.413
10	5	5.168	1.091
	10	5.363	0.679
5	5	5.108	1.185
	10	5.358	0.093

4.3 IMPAXX™

As espumas poliméricas, nomeadamente as de baixa densidade são actualmente empregues numa grande variedade de aplicações devido à sua excelente capacidade de absorção de energia. Na indústria automóvel, por exemplo, as condições impostas pela *Federal Motor Vehicle Standards* (FMVSS) incluem já a utilização de materiais celulares poliméricos em diversas zonas no interior do veículo, para protecção dos ocupantes em acidentes de viação [Zhang 98].

O IMPAXX™ é uma espuma de célula fechada produzida a partir da expansão de um material termoplástico. Na figura 4.10 são apresentados alguns exemplos deste material. Trata-se de um material inovador, que tem exibido nos últimos anos uma grande expansão na indústria de materiais para absorção de energia de impacto, assim como em qualquer sector em que a segurança passiva seja um aspecto fundamental. Trata-se de um material patenteado pela empresa Dow Automotive e, por este motivo, as suas características e propriedades mecânicas não estão disponíveis na literatura [Dow 06].

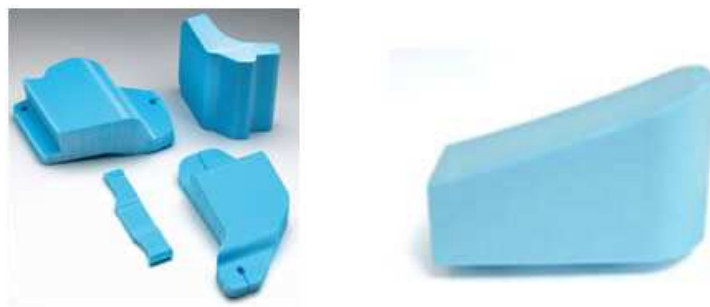


Figura 4.10: Exemplos de aplicação de IMPAXX™.

Actualmente, o IMPAXXTM encontra aplicações nas indústrias automóvel, aeroespacial, militar, marítima e dos transportes colectivos. Na indústria automóvel, algumas das aplicações típicas são: frisos das portas laterais e pilares para protecção da cabeça, sistemas de protecção contra impacto lateral nas portas, sistemas de pára-choques (frontal e traseiro), reforços em zonas de protecção contra impacto frontal, reforços nas zonas de protecção das pernas contra impacto lateral, e painéis estruturais (fundo estrutural, viseiras, *etc.*) Segundo a companhia Dow Automotive, o IMPAXXTM é uma alternativa de baixo custo aos materiais de absorção de energia tradicionais, como o poliuretano ou o poliestireno expandido.

De forma a determinar os parâmetros necessários para realizar simulações numéricas de impacto, realizaram-se ensaios experimentais de compressão com amostras de IMPAXXTM300. Foram realizados ensaios de compressão *quasi*-estática sobre 24 provetes com dimensões médias $30 \times 30 \times 30$ [mm³] e densidade média $\bar{\rho} = 33.661$ kg/m³.

De forma a averiguar se a velocidade de deformação influencia o comportamento mecânico do material, realizaram-se ensaios a quatro velocidades de compressão diferentes. Para tal, efectuaram-se quatro séries de ensaios, cada série composta por seis ensaios. As velocidades de deformação foram de 5, 10, 15 e 20 mm/min. As referências alfanuméricas designativas dos ensaios realizados são descritas do seguinte modo: MMMVV–FF. MMM representa o material utilizado de acordo com a tabela 4.1, VV é a velocidade de deformação em milímetros por minuto e FF é a fase em que os ensaios foram realizados. Neste caso a fase é designada por EX, representando a fase experimental. Os provetes utilizados para os ensaios experimentais estão apresentados na figura 4.11.

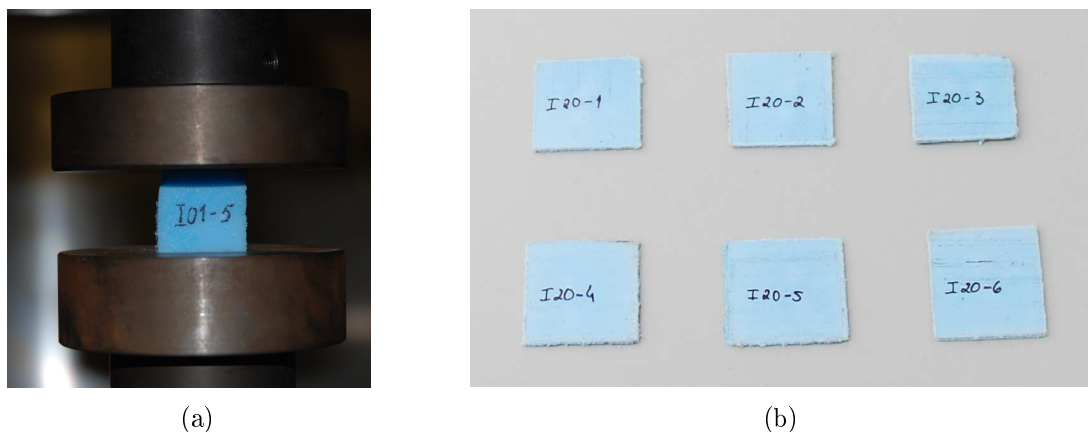


Figura 4.11: Provetes de IMPAXXTM300 (a) no início do ensaio de compressão e (b) após compressão.

Os ensaios de compressão foram realizados na máquina universal de ensaios, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, ShimadzuTM AG-50kNG, com uma célula de carga de 50 kN. Os provetes foram comprimidos até cerca de 3% do seu volume inicial, tendo o cuidado de não deixar a carga máxima aproximar-se do limite da célula de carga utilizada. Os resultados de força-deslocamento foram registados e, após tratamento dos mesmos, obtiveram-se as curvas representadas no gráfico da figura 4.12. Estes resultados definem o comportamento mecânico à compressão em termos de tensão-deformação, dos provetes utilizados.

Através da análise do gráfico da figura 4.12, pode observar-se que o comporta-

mento do IMPAXXTM300 à compressão não varia significativamente com a velocidade de deformação dado que não se verificam diferenças significativas entre ensaios para diferentes velocidades de compressão.

A curva seleccionada para representar o comportamento deste material foi a que se mostrou mais favorável em termos de capacidade de absorção de energia específica, isto é, a que corresponde a uma maior área abaixo da curva tensão-deformação. Seleccionou-se, portanto, a curva que apresenta o patamar de tensão mais elevado, ou seja, o valor mais alto de tensão de patamar σ_{pl} ⁴. Esta curva é a que se representa no gráfico da figura 4.13.

Da análise dos resultados obtidos podem ainda determinar-se outras propriedades mecânicas da espuma como o módulo de elasticidade e a tensão limite de elasticidade. O módulo de elasticidade obtém-se directamente a partir do cálculo do declive da parte inicial do gráfico, correspondente à zona de deformação elástica.

Porém, os resultados experimentais obtidos não fornecem todos os parâmetros necessários para a realização das simulações numéricas. É ainda necessário determinar os valores do coeficiente de Poisson, ν , módulo de Young, E_s , e da tensão de limite de elasticidade, σ_y ⁵, do material denso (compactado). Sabendo que o material de que é constituída a espuma é um termoplástico, o módulo de elasticidade está compreendido entre 1.4 e 3.4 GPa e a tensão de ruptura entre 7 e 80 MPa [Kalpakjian 05]. Uma vez que a generalidade dos materiais termoplásticos apresenta comportamento elástico perfeitamente plástico, a tensão limite de elasticidade é, neste caso, substituída pela tensão de ruptura, σ_u , ou seja, $\sigma_y \approx \sigma_u$. Também nesta situação se procurou utilizar os dados mais favoráveis em termos de capacidade de absorção de energia. Deste modo, utilizaram-se os valores mais elevados dentro das gamas disponíveis quer do módulo de Young quer da tensão de ruptura.

O coeficiente de Poisson do material termoplástico em questão não se encontra na literatura e não pode ser determinado através dos ensaios de compressão experimentais realizados no âmbito deste trabalho. No entanto, sabe-se que o modelo de comportamento do material utilizado nas simulações numéricas realizadas em LS-DynaTM considera o coeficiente de Poisson da espuma $\nu = 0$. Assim, optou-se por averiguar se o valor do coeficiente de Poisson do material denso teria influência nos resultados das simulações. Para tal, realizaram-se ensaios numéricos com as especificações indicadas na figura 4.1, fazendo variar unicamente o coeficiente de Poisson do material denso. Analisaram-se os resultados obtidos com valores do coeficiente de Poisson compreendidos entre 0.30 e 0.49. Compararam-se os resultados obtidos em termos de variação da energia cinética do sistema e de variação da força envolvida com o deslocamento do ponto de referência (ponto A, figura 4.1). Estes resultados estão representados na figura 4.14.

Através da análise destes resultados pode verificar-se que não existem diferenças significativas no comportamento do material. Consequentemente, pode concluir-se que o coeficiente de Poisson não influencia de forma relevante as variáveis de interesse para o caso em estudo. Deste modo, optou-se por admitir que o resultado final pretendido é independente do coeficiente de Poisson do material denso, assumindo um valor intermédio $\nu = 0.4$.

⁴ Do inglês *plateau stress*.

⁵ Do inglês *yield stress*.

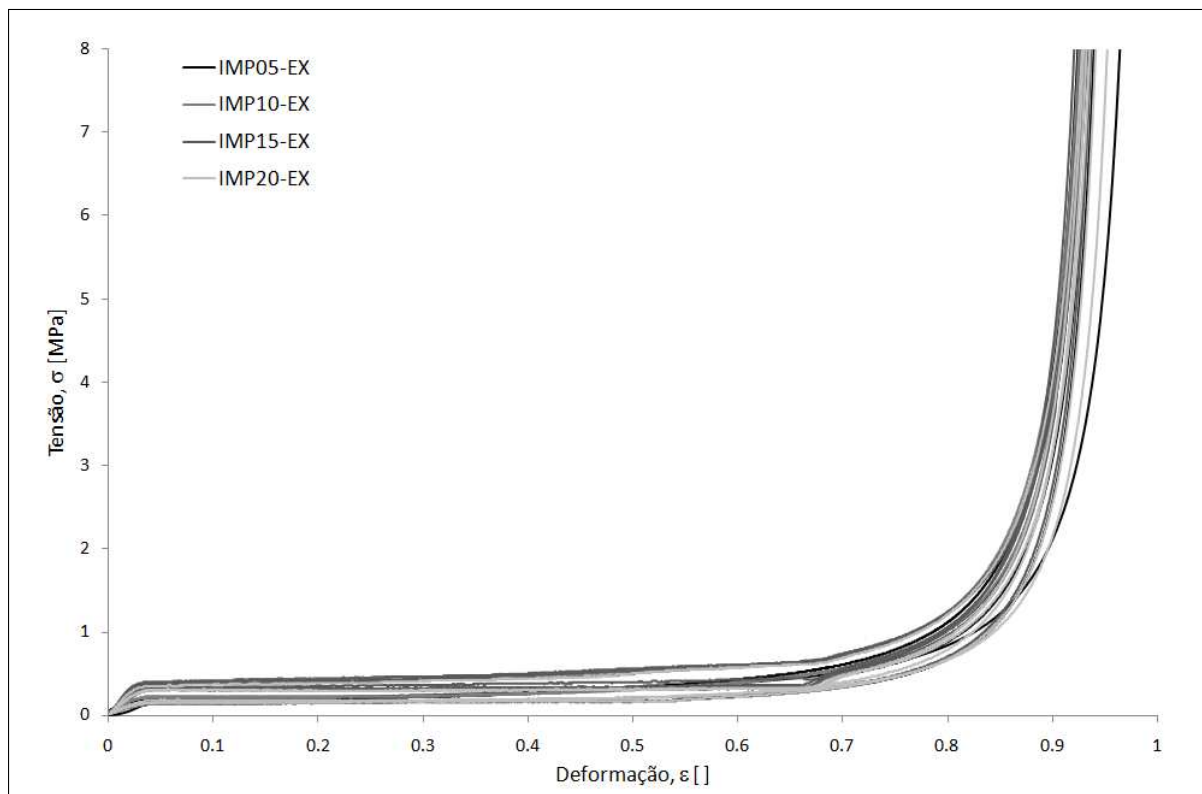


Figura 4.12: Curvas experimentais de comportamento, obtidas para o IMPAXX™ 300 (compressão). A escala da tensão foi truncada para melhor visualização dos resultados.

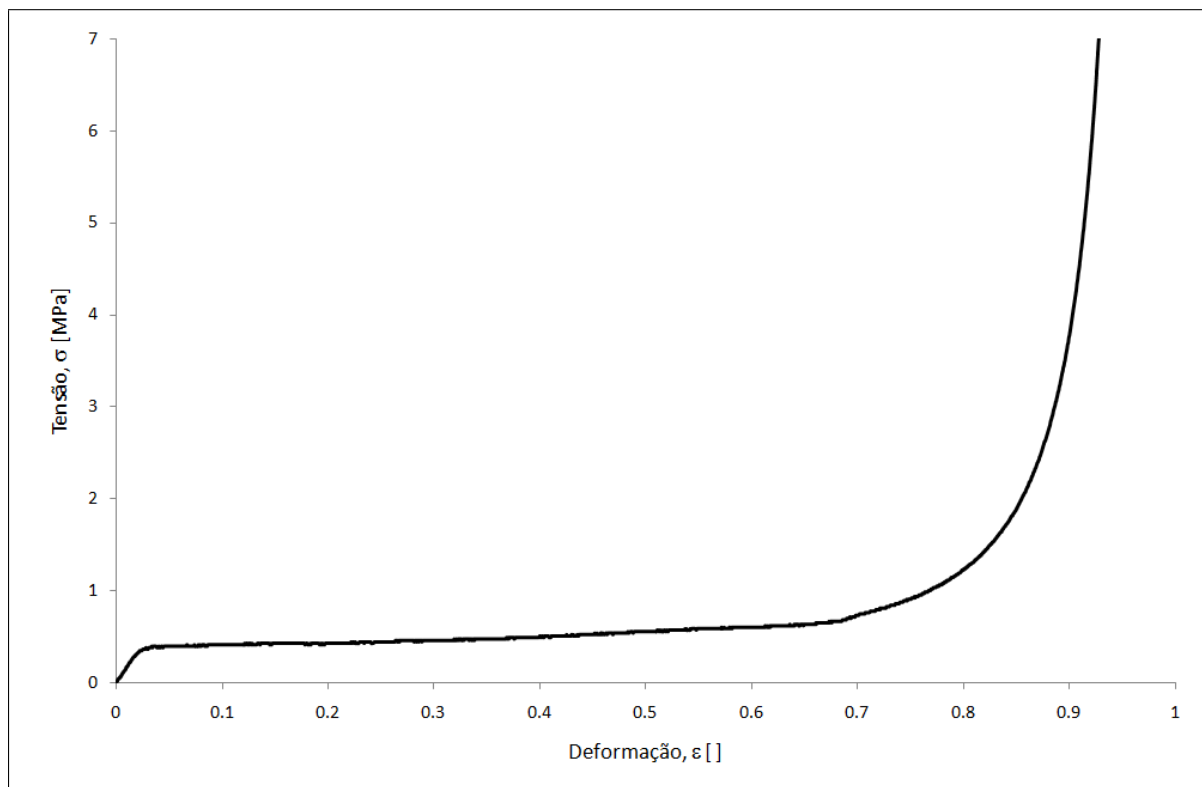


Figura 4.13: Comportamento à compressão do IMPAXX™ 300. A escala da tensão foi truncada para melhor visualização. O valor máximo corresponde a $\sigma = 46.046$ MPa e $\epsilon = 0.97$.

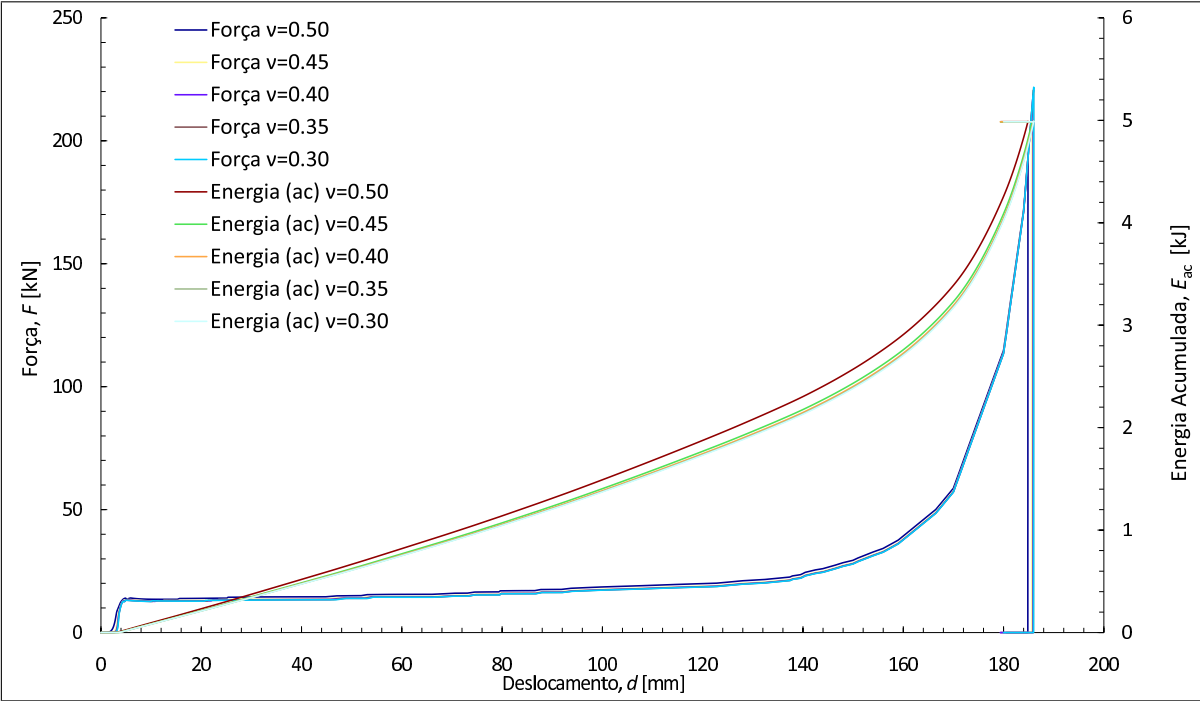


Figura 4.14: Variação da energia acumulada e da força com o deslocamento para determinação da influência do coeficiente de Poisson no comportamento mecânico do IMPAXXTM.

Tabela 4.5: Propriedades mecânicas do IMPAXXTM utilizadas na caracterização dos materiais.

Propriedades Mecânicas	ρ [kg/m ³]	E [MPa]	σ_y [MPa]	ν
Material Expandido	33.661 ^a	16.322 ^a	–	–
Material Denso	–	3400 ^b	80 ^b	0.40 ^c

^a Obtido experimentalmente.
^b [Kalpakjian 05].
^c Obtido através de simulação numérica em LS-DynaTM.

Capítulo 5

Ensaaios de Caracterização

Nesta secção realizam-se simulações numéricas em LS-DynaTM a fim de caracterizar o comportamento mecânico dos materiais utilizados em caso de impacto, e confrontá-los no mesmo âmbito. As simulações são realizadas de acordo com especificações pré-definidas, isto é, realizam-se simulações numéricas para diferentes valores de energia cinética inicial da parede móvel, fazendo variar unicamente a massa da mesma.

5.1 Comportamento mecânico da espuma de Alumínio

Para determinar o comportamento mecânico e a capacidade de absorção de energia da espuma de Alumínio realizaram-se simulações numéricas, de acordo com a configuração especificada na figura 4.1. A energia cinética inicial do impacto foi limitada ao intervalo $3 \leq E_{ci} \leq 100$ kJ. Optou-se por limitar superiormente os ensaios numéricos a uma energia cinética $E_{ci} = 100$ kJ, uma vez que esta está associada a uma massa superior a 1000 kg à velocidade padrão considerada $v_0 = 13.89$ m/s. Esta energia máxima está de acordo com as normas de realização de *crash tests* de impacto lateral realizados pela Euro NCAP [NCAP 04].

Os resultados obtidos em termos de variação de força exercida na parede móvel em função do tempo, para todas as simulações realizadas com espuma de Alumínio, são apresentados nos gráficos das figuras 5.1 e 5.2. Pode observar-se nas curvas dos ensaios em que $E_{ci} \geq 30$ kJ, a existência de dois aumentos bruscos na força exercida na parede móvel. O primeiro corresponde ao início da compressão do material, ou seja, ao momento inicial do choque. O segundo aumento brusco é determinado pelo instante em que o material densifica. Neste instante o valor do módulo de elasticidade assume o valor do módulo de elasticidade do material denso. Este comportamento não se observa para as simulações realizadas com $E_{ci} \leq 20$ kJ. Apenas se verifica o aumento inicial da força coincidente com o instante em que a parede móvel entra em contacto com o bloco. Tal se deve ao facto de, neste caso, o material não chegar a densificar.

No gráfico da figura 5.3 representa-se a variação da aceleração no ponto de referência indicado na figura 4.1 e da força de reacção aplicada à parede, com o tempo. A variação

da força com o tempo torna evidente a existência de um comportamento elástico inicial seguido de um patamar de força que se estende até $t \approx 12$ ms. Neste instante inicia-se o processo de densificação, até ao ponto de carga máxima, em que os valores de força são cerca de 10 vezes superiores à força de patamar.

Através da análise dos resultados apresentados na figura 5.3, pode ainda verificar-se que o comportamento oscilatório da aceleração se inicia precisamente no instante em que a força deixa de ser aplicada na parede móvel, isto é, no momento em que deixa de haver contacto entre a parede e o bloco. Estas oscilações da aceleração devem-se ao facto do bloco estar livre. A variação oscilatória amortecida da aceleração, visível nestes resultados, inicia-se no instante $t \approx 14,4$ ms, imediatamente após o ponto de carga (força) máxima.

O objectivo desta dissertação implica o confinamento do material entre duas chapas de aço, correspondentes às partes interior e exterior da porta do automóvel. Deste modo, a variação da aceleração em instantes ulteriores ao impacto não é um parâmetro de análise e não será incluída nos resultados que se seguem. Fica assim facilitada a visualização do comportamento dos materiais.

A variação da aceleração do ponto de referência (ponto A, figura 4.1) em função do tempo é representada nos gráficos das figuras 5.4 e 5.5. Verifica-se o mesmo fenómeno que se observou para a evolução da força aplicada na parede móvel. Deste modo, para impactos com energia cinética inicial $E_{ci} < 30$ kJ existe um pico de aceleração inicial e, posteriormente, uma evolução quase constante. Para impactos em que $E_{ci} \geq 30$ kJ acontece o mesmo, seguido de um aumento brusco de aceleração, coincidente com a densificação do material, decrescendo de seguida também bruscamente após libertação do bloco.

Nos gráficos das figuras 5.6 e 5.7 está representada a variação de energia cinética da parede móvel ao longo de toda a duração do choque. As simulações de impacto com energia cinética inicial $E_{ci} < 30$ kJ apresentam curvas energia-tempo que decrescem lentamente até que a energia cinética se anula. As restantes simulações apresentam um decréscimo da energia cinética lento e aproximadamente linear, até ao instante em que o material começa a densificar. A partir deste instante dá-se um decréscimo brusco da energia, até se anular. O aumento da energia imediatamente a seguir ao instante em que a energia assume um valor nulo é consequência do retorno elástico do material depois de densificado.

Quando analisados os gráficos relativos à variação da energia cinética acumulada e da força em função do deslocamento do ponto de referência, verifica-se que para $E_{ci} < 30$ kJ (figura 5.8), a energia cinética varia de forma aproximadamente linear, uma vez que o material não atinge o estado de densificação. Já na segunda série de simulações (figura 5.9), em que $E_{ci} \geq 30$ kJ, verifica-se uma variação aproximadamente exponencial a partir do momento em que o material densifica.

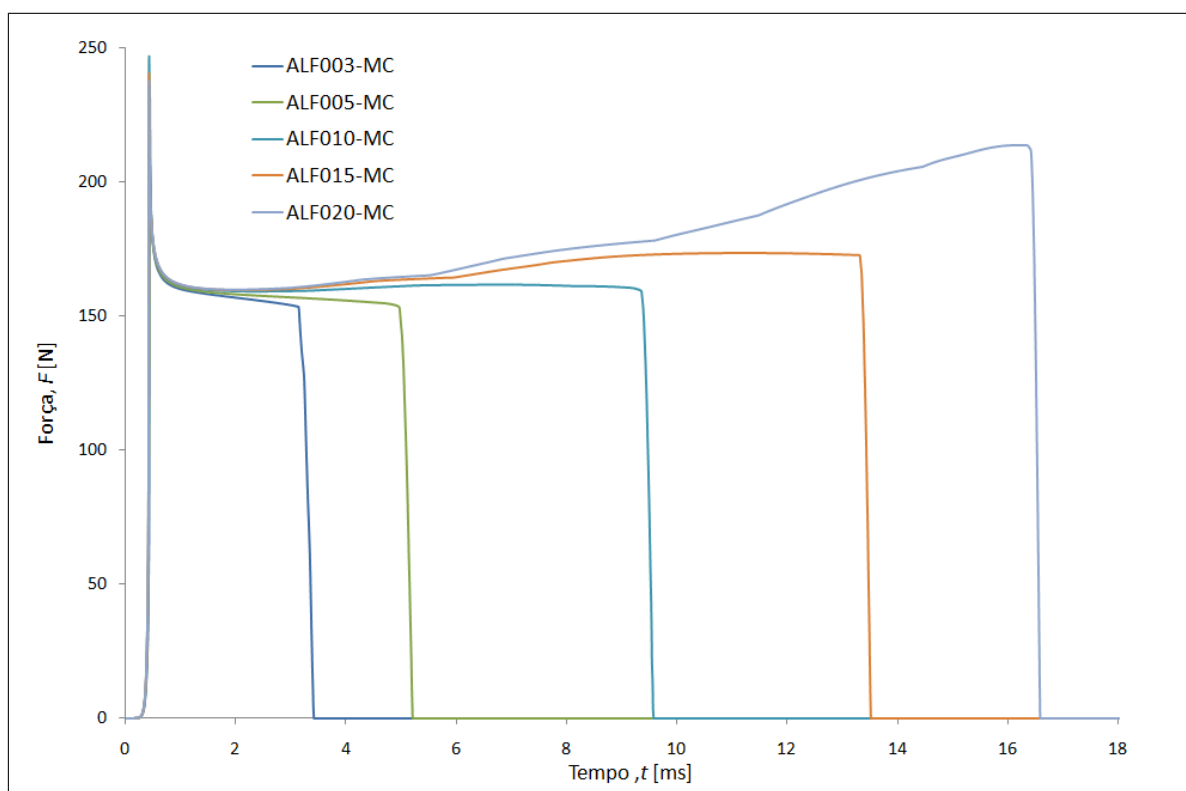


Figura 5.1: Variação da força de reacção na parede móvel em função do tempo com $E_{ci} < 30$ kJ, para os ensaios realizados com espuma de Alumínio.

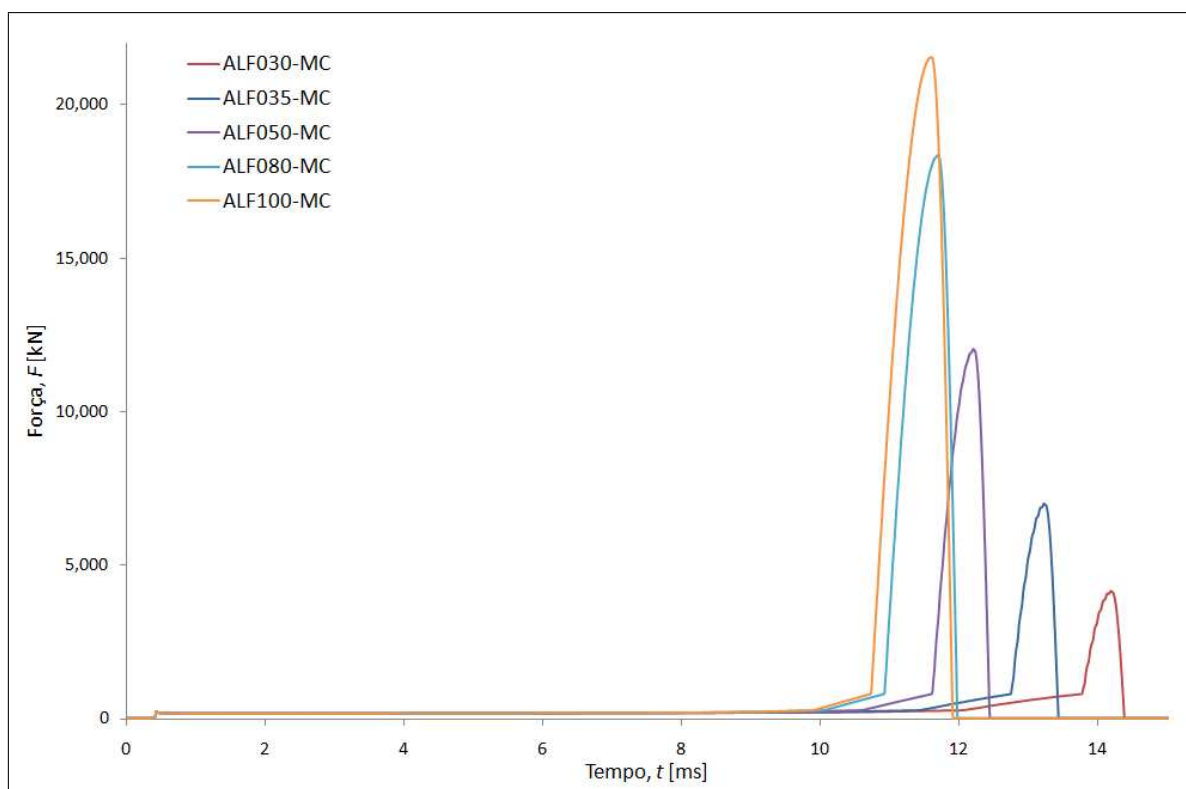


Figura 5.2: Variação da força de reacção na parede móvel em função do tempo com $E_{ci} \geq 30$ kJ, para os ensaios realizados com espuma de Alumínio.

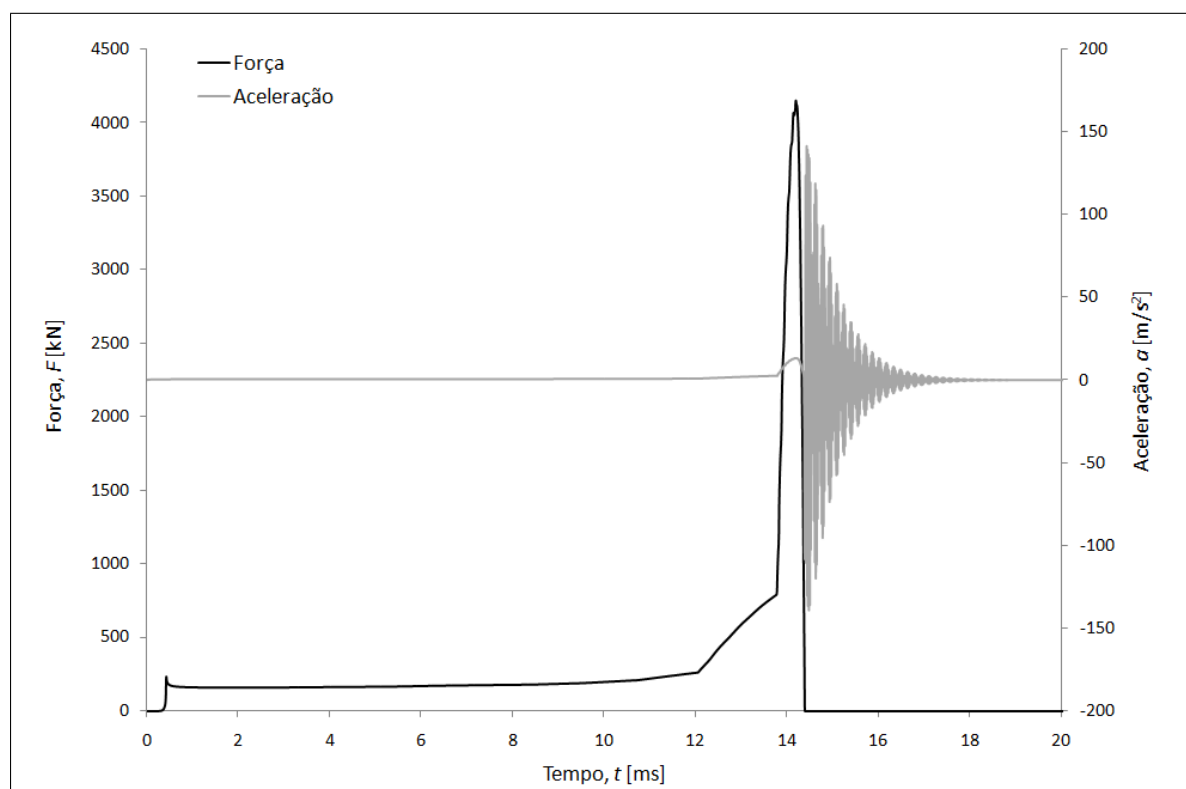


Figura 5.3: Variação da aceleração e da força de reacção na parede com o tempo para $E_{ci} = 30$ kJ, para os ensaios realizados com espuma de Alumínio.

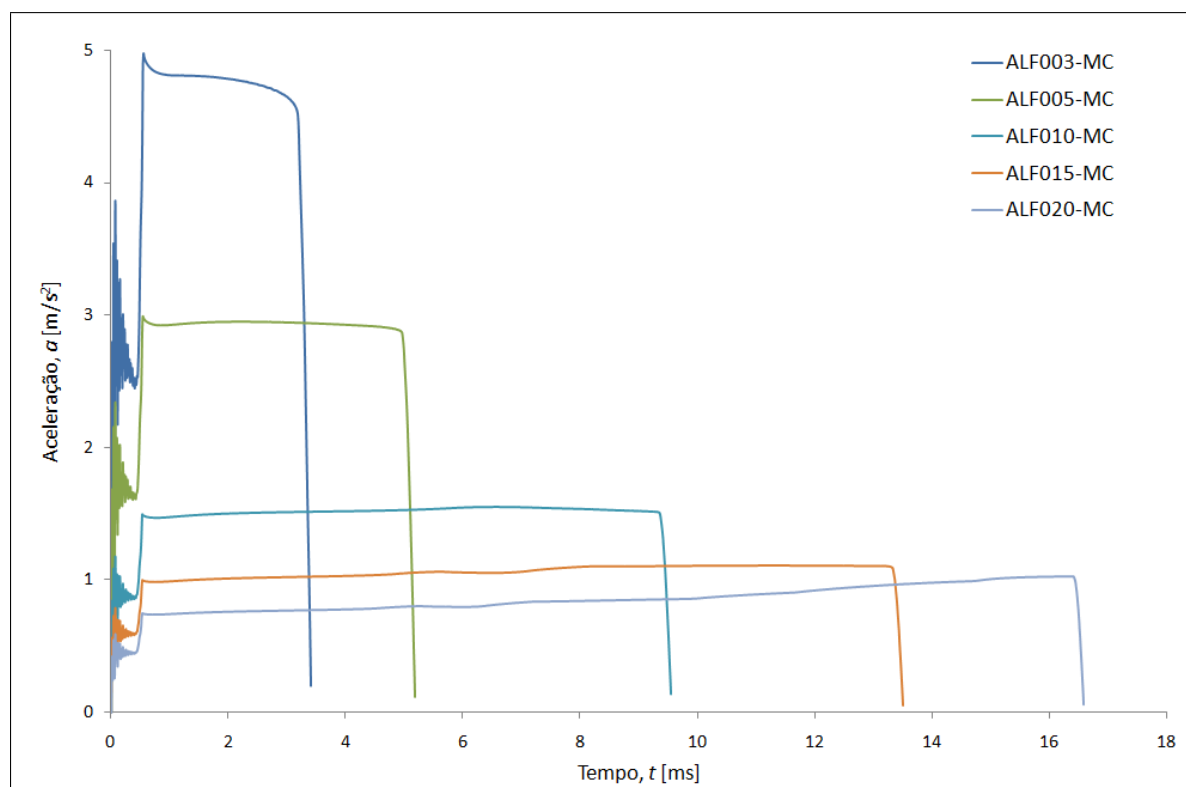


Figura 5.4: Variação da aceleração (ponto A, figura 4.1) em função do tempo para $E_{ci} < 30$ kJ, para as simulações realizadas com espuma de Alumínio.

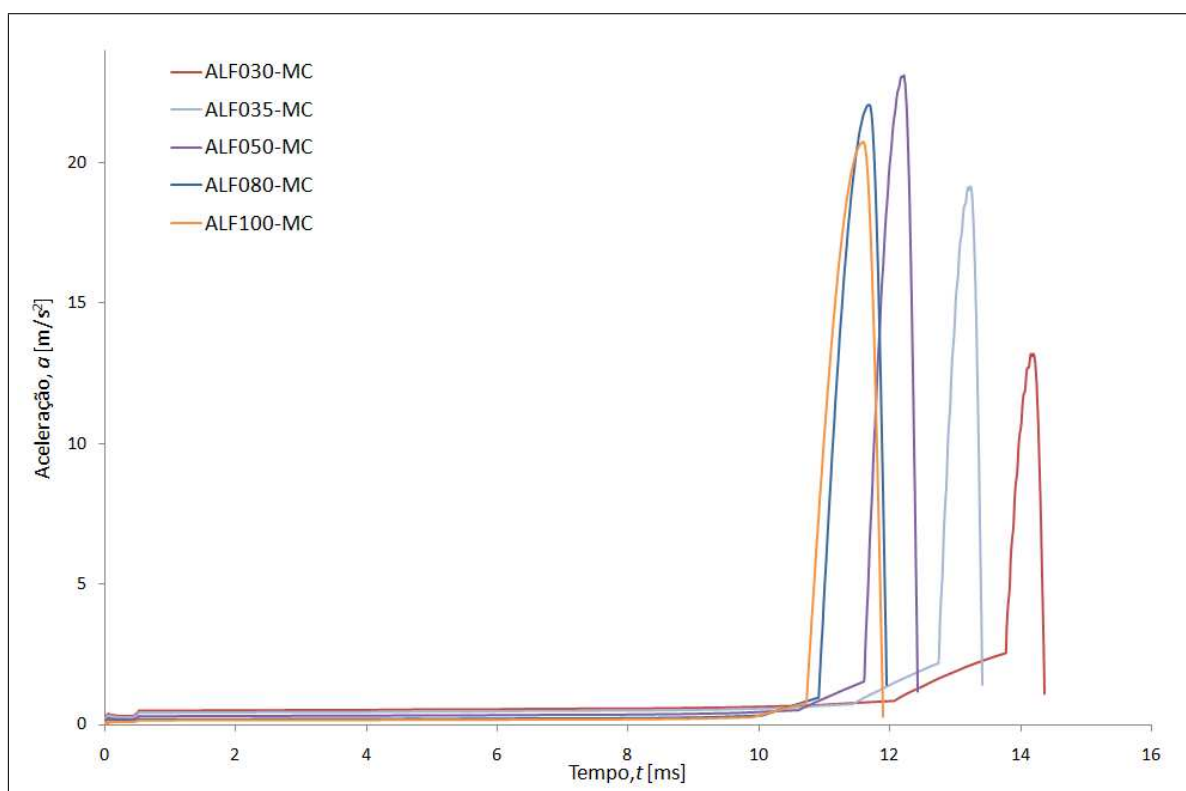


Figura 5.5: Variação da aceleração (ponto A, figura 4.1) em função do tempo para $E_{ci} \geq 30$ kJ, para as simulações realizadas com espuma de Alumínio.

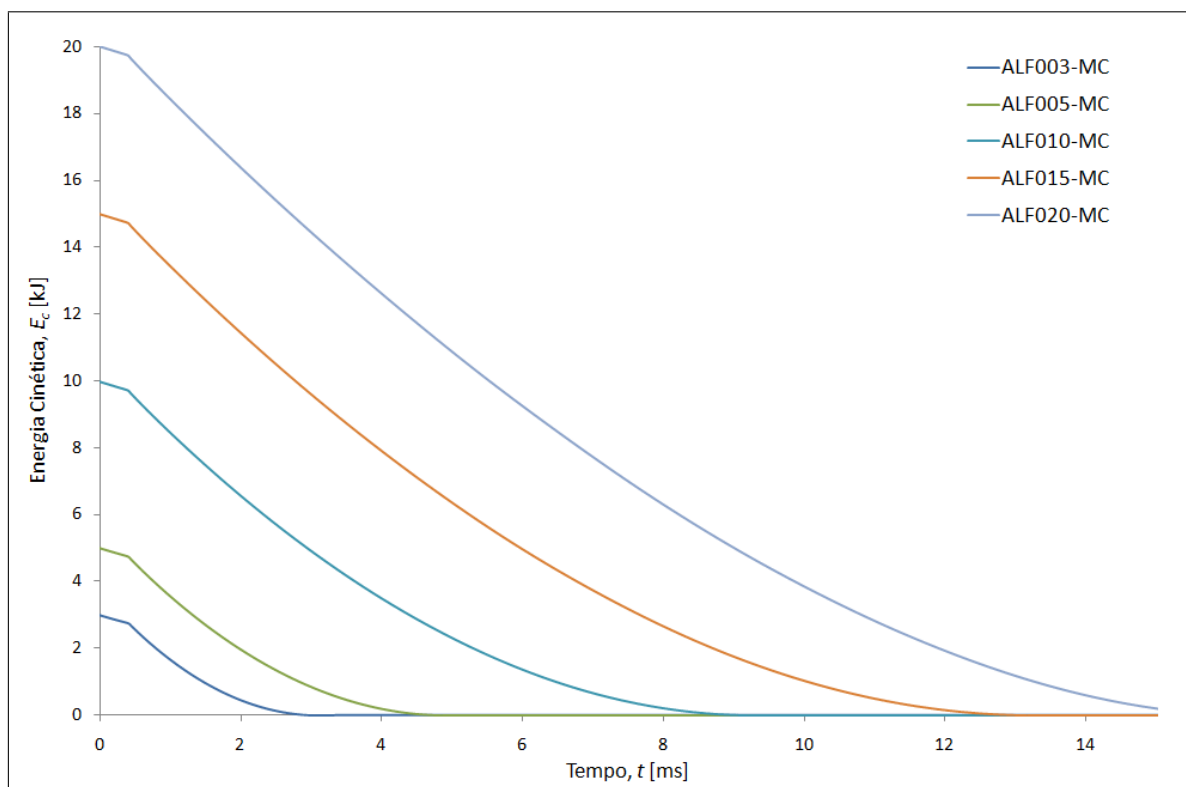


Figura 5.6: Variação da energia cinética da parede móvel em função do tempo para $E_{ci} < 30$ kJ, para as simulações realizadas com espuma de Alumínio.

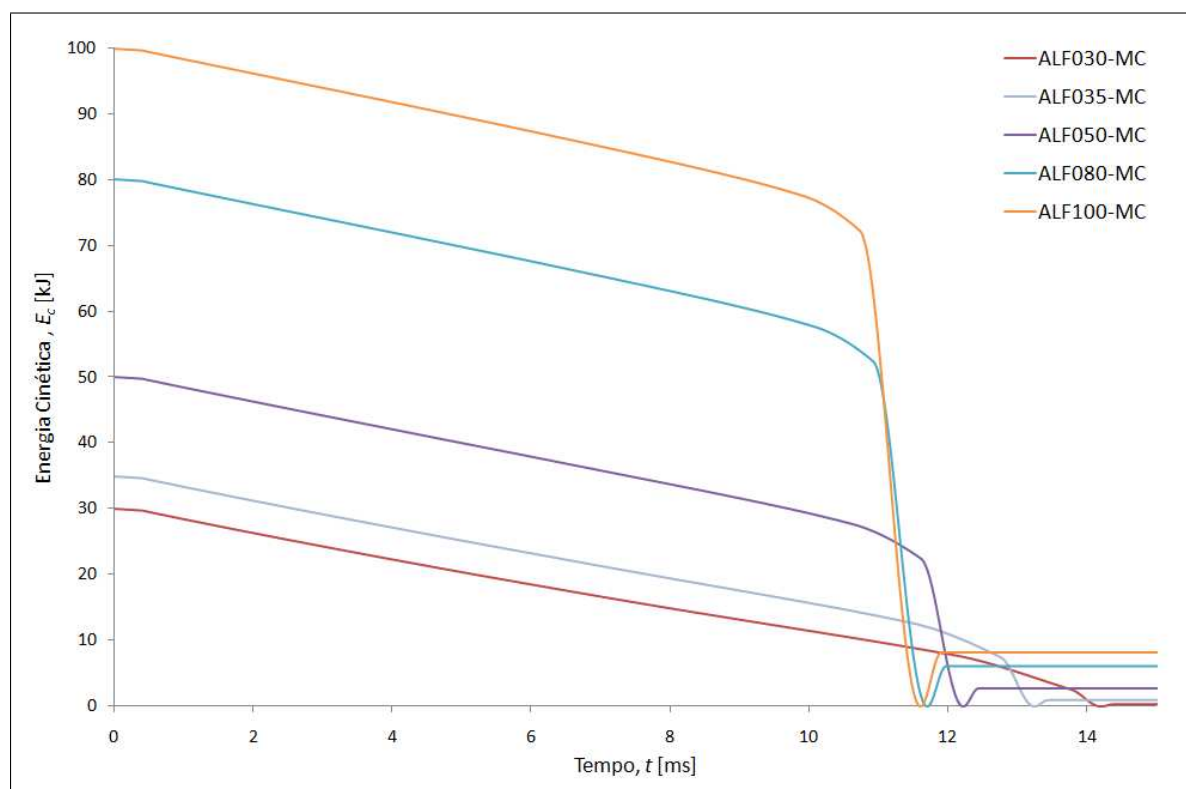


Figura 5.7: Variação da energia cinética da parede móvel em função do tempo para $E_{ci} \geq 30$ kJ, para as simulações realizadas com espuma de Alumínio.

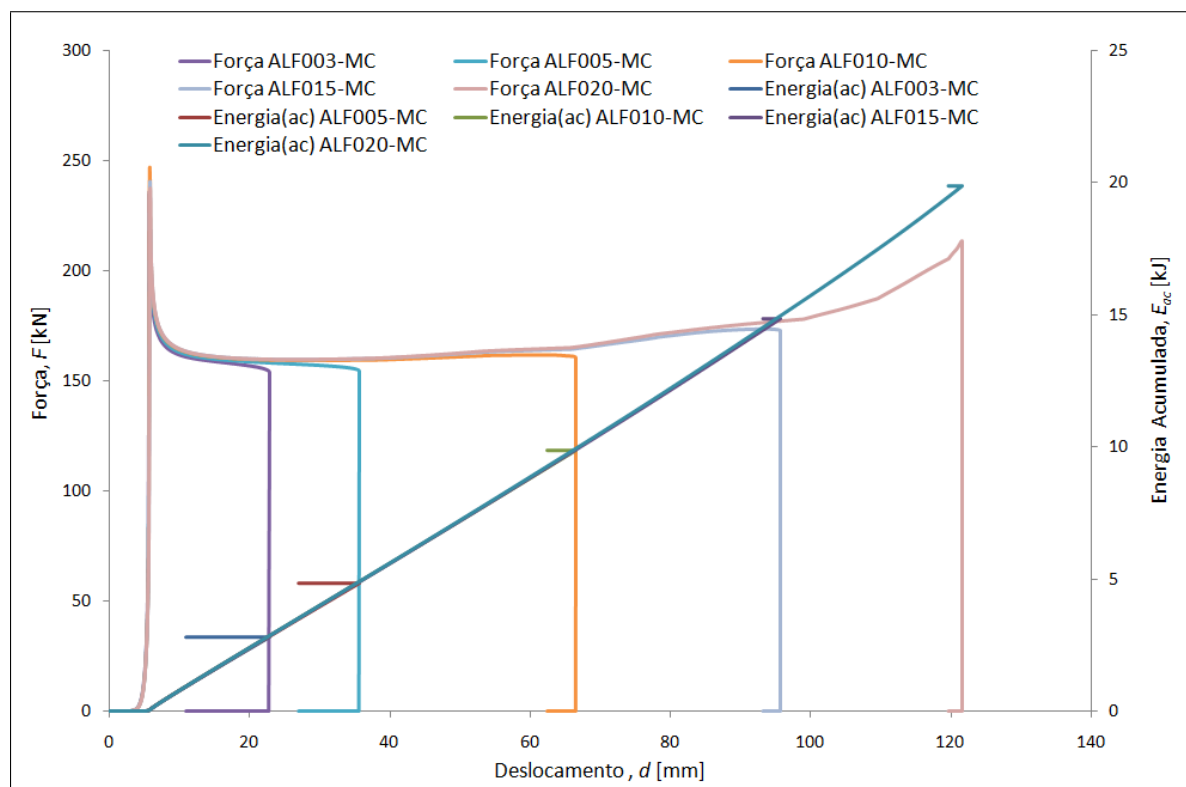


Figura 5.8: Evolução da energia acumulada da parede móvel e da força aplicada em função do deslocamento do ponto de referência (ponto A, figura 4.1) para $E_{ci} < 30$ kJ, para as simulações com espuma de Alumínio.

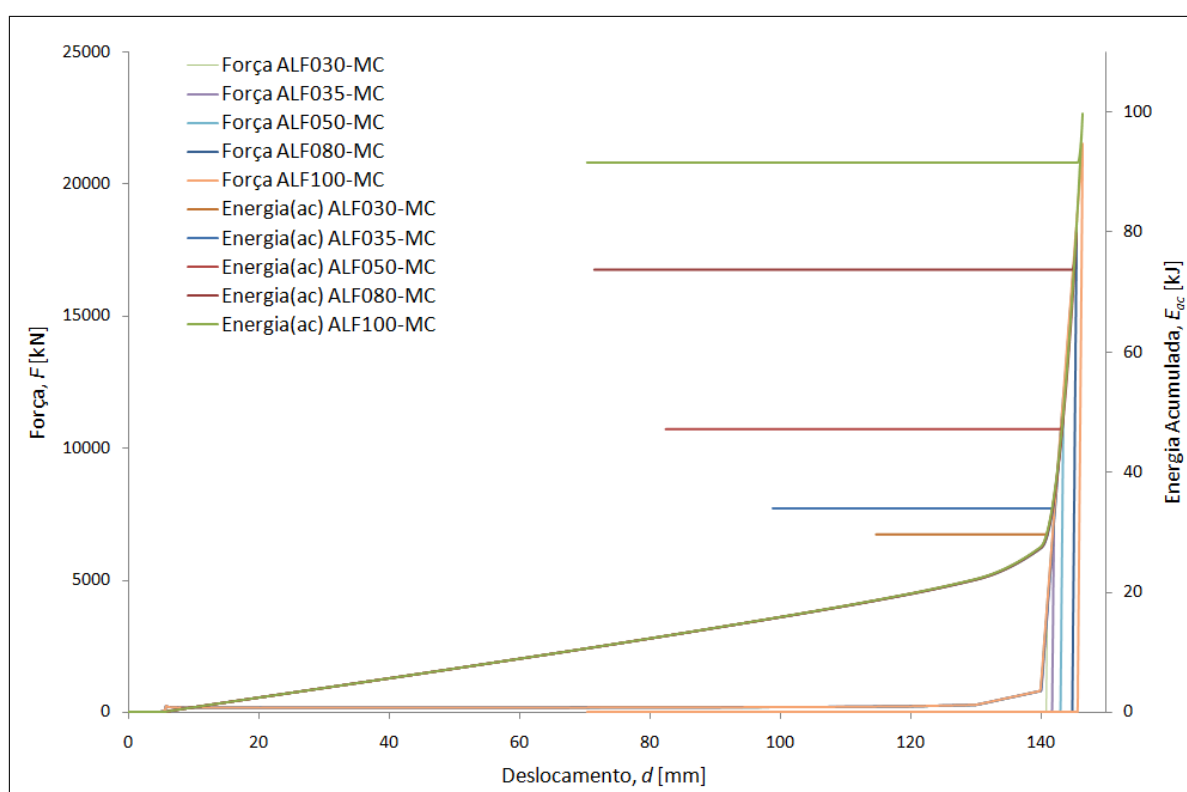


Figura 5.9: Evolução da energia acumulada da parede móvel e da força aplicada em função do deslocamento do ponto de referência (ponto A, figura 4.1) para $E_{ci} \geq 30$ kJ, para as simulações com espuma de Alumínio.

5.2 Comportamento mecânico do IMPAXXTM

Para estudar o comportamento mecânico ao impacto do IMPAXXTM300 foram realizadas simulações numéricas de impacto para valores de energia cinética inicial $3 \leq E_{ci} \leq 20$ [kJ], uma vez que, para as condições de ensaio utilizadas neste trabalho, o material não suporta valores de E_{ci} superiores a 20 kJ.

No gráfico da figura 5.10 está representada a evolução da força de reacção na parede móvel em função do tempo. Para uma energia cinética inicial $E_{ci} = 3$ kJ a força exhibe um ligeiro aumento até ao momento em que deixa de ser aplicada. Para condições de energia cinética inicial superiores ($E_{ci} > 3$ kJ) verifica-se que este aumento é consideravelmente superior, atingindo um máximo para o impacto com $E_{ci} = 20$ kJ. Este fenómeno deve-se à densificação do material já que, quanto mais denso este se encontra, maior será a força necessária para o deformar. O mesmo comportamento é visível em termos da evolução da aceleração em função do tempo, representada na figura 5.11. Na representação desta curva torna-se evidente que as variações menos significativas de aceleração e, consequentemente, os ensaios em que se atingem valores mais baixos de aceleração, são aqueles em que a energia inicial de impacto, E_{ci} , é menor. Este comportamento pode ser explicado pelo facto de ser precisamente nos impactos de maior energia que a aceleração varia de forma mais brusca.

A evolução de energia cinética no tempo, representada no gráfico da figura 5.12, mostra que para a simulação realizada com $E_{ci} = 3$ kJ, a energia decresce de forma aproximadamente linear até se anular. No entanto, para todas as restantes simulações, o decréscimo até ao valor nulo de energia passa por um estágio de decréscimo lento, aproximadamente linear, seguido de um estágio de decréscimo muito rápido, mas ainda aproximadamente linear. Verifica-se ainda haver recuperação de energia, dado as curvas exibirem um aumento até estabilização após o instante em que a energia se anula, apesar de esta recuperação ser ligeira para as simulações realizadas para energias muito baixas. Pode, portanto, concluir-se que para valores de energia cinética inicial superiores a 3 kJ o bloco atinge sempre o estágio de densificação.

No gráfico da figura 5.13, representa-se a evolução da energia acumulada pela parede móvel e da força em função do deslocamento do ponto de referência (ponto A, figura 4.1). Em todos os casos representados, exceptuando o ensaio realizado com $E_{ci} = 3$ kJ, pode observar-se o aumento aproximadamente linear da energia seguido de um aumento aproximadamente exponencial da mesma. O estágio de aumento aproximadamente exponencial da energia é acompanhado por um aumento mais rápido da força, ambos os comportamentos são consequência da densificação do material do bloco.

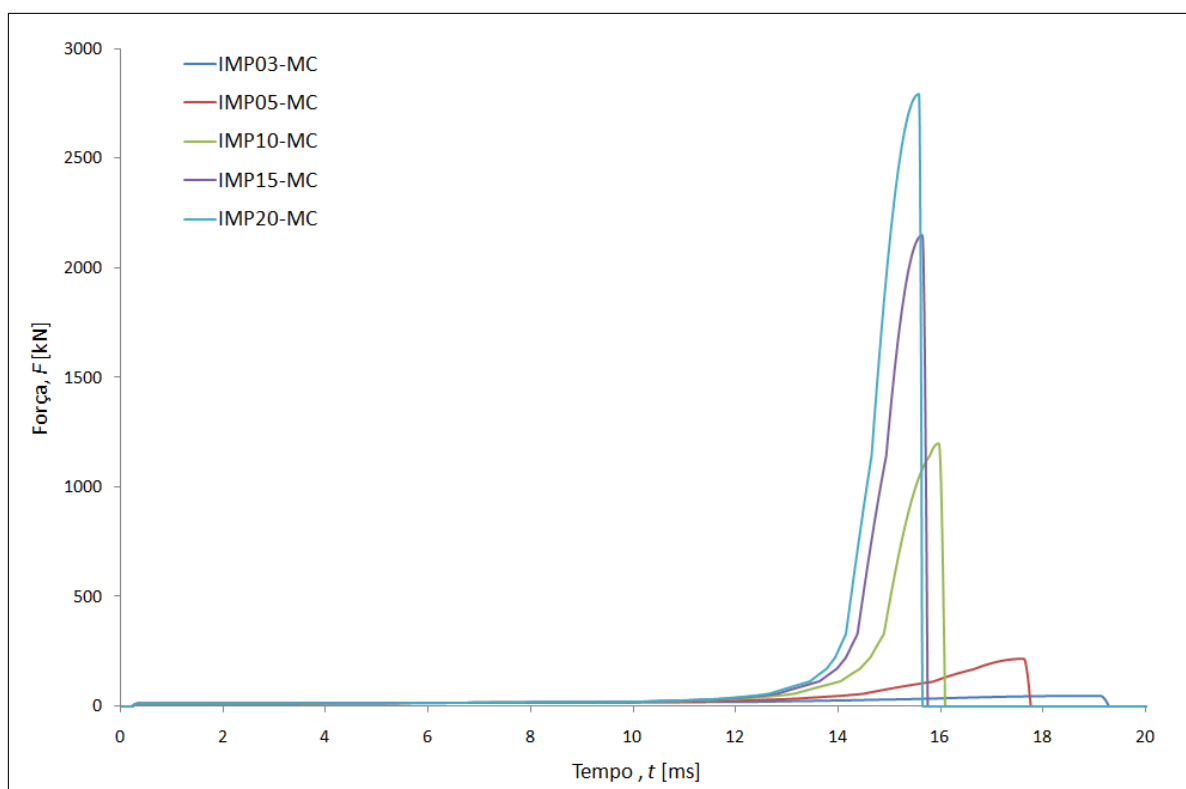


Figura 5.10: Variação da força de reacção na parede móvel em função do tempo, para os ensaios realizados com IMPAXXTM300.

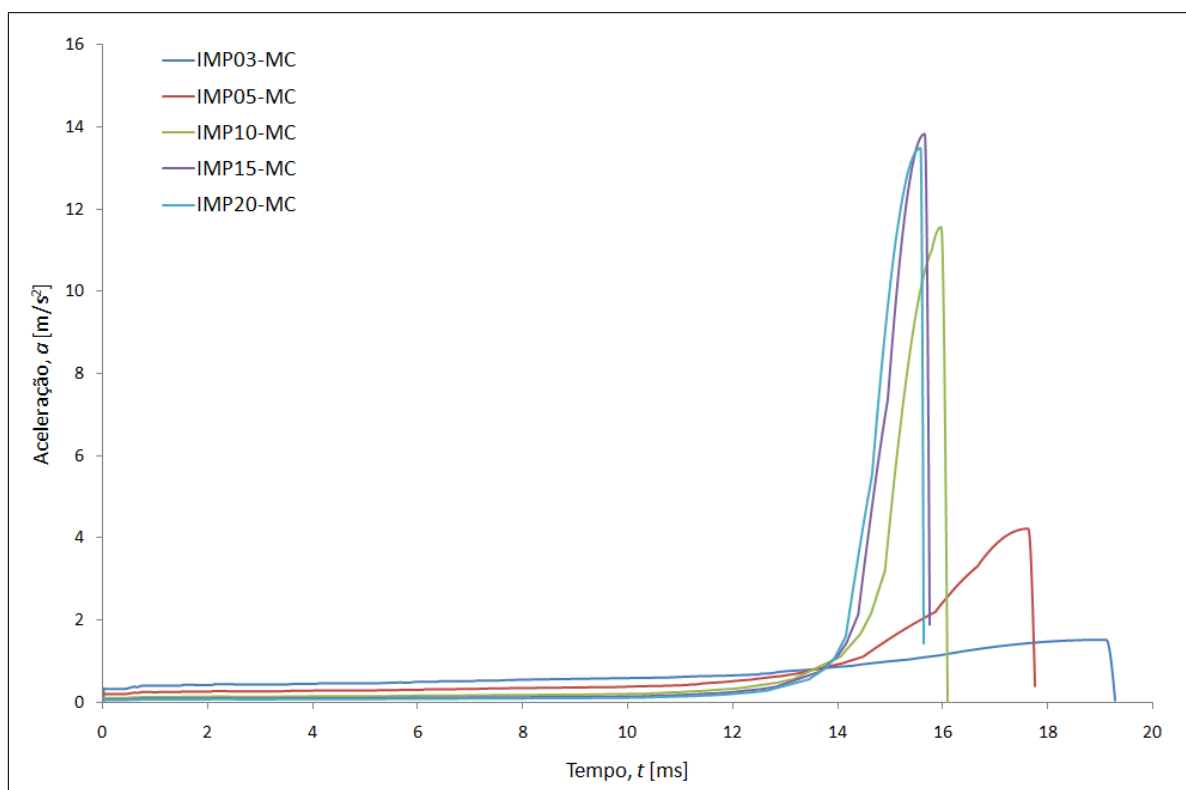


Figura 5.11: Variação da aceleração do ponto de referência (ponto A, figura 4.1) em função do tempo, para os ensaios realizados com IMPAXXTM300.

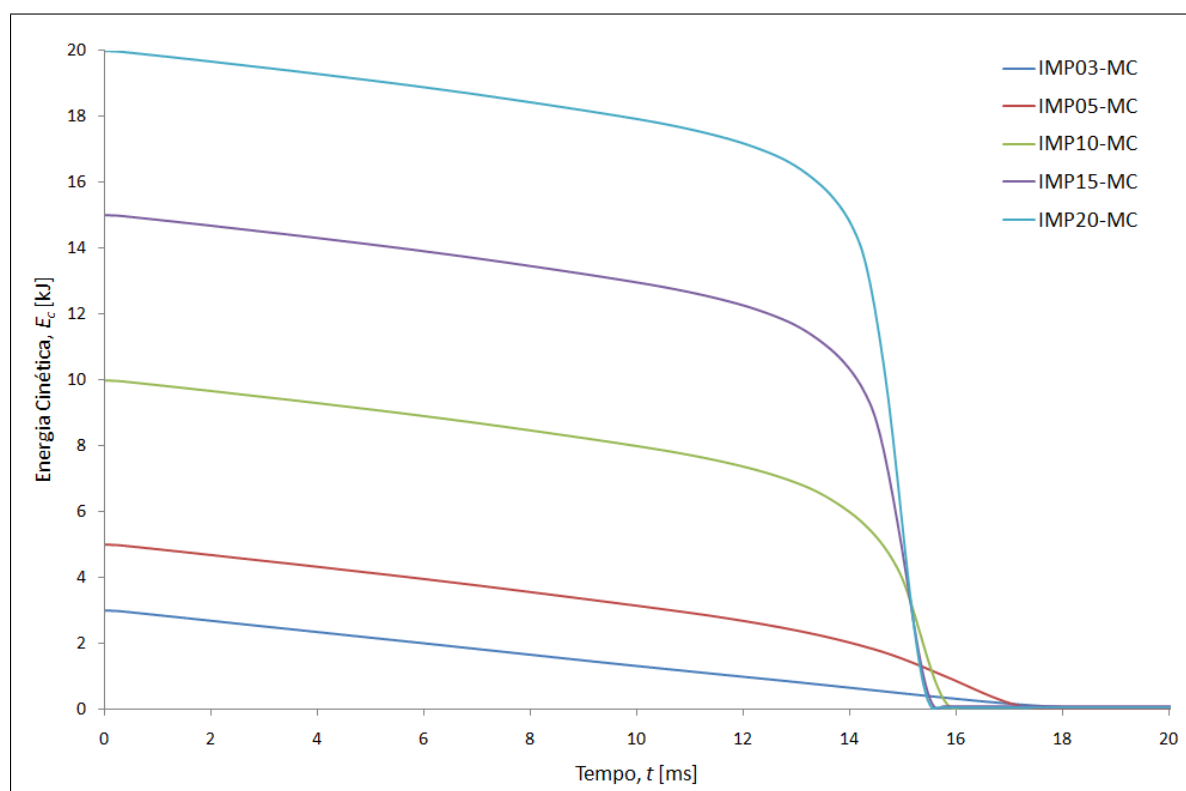


Figura 5.12: Variação da energia cinética da parede móvel em função do tempo, para os ensaios realizados com IMPAXXTM300.

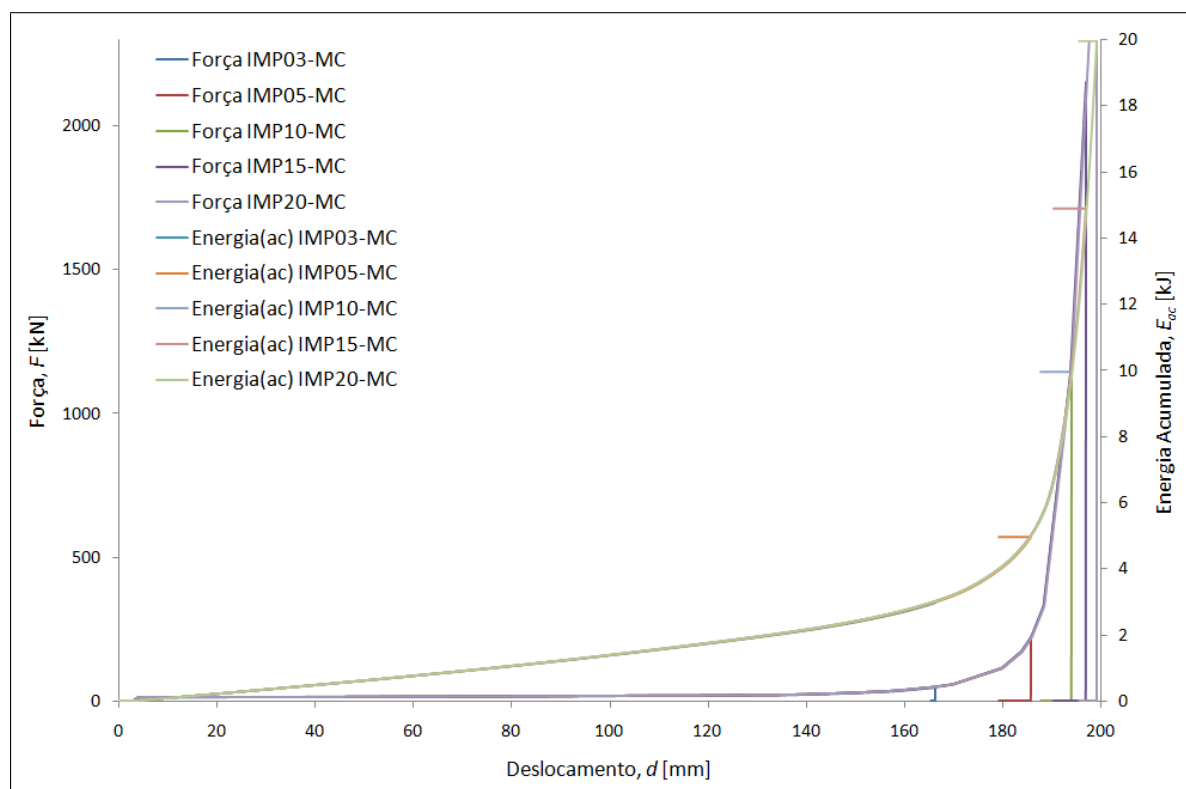


Figura 5.13: Variação da energia acumulada e da força de reacção na parede móvel em função do deslocamento do ponto de referência (ponto A, figura 4.1), para os ensaios realizados com IMPAXXTM300.

5.3 Comportamento mecânico da espuma de poliuretano

A espuma de poliuretano é um material de engenharia muito utilizado em aplicações de absorção de energia. Este material tem vindo a ser utilizado numa grande variedade de aplicações distintas como, por exemplo, empacotamento e acolchoamento. O poliuretano é, também, já muito utilizado em montagens de motores, em substituição de borrachas, uma vez que este material é cerca de 40% mais leve que a borracha. A espuma de poliuretano pode encontrar-se quer nos painéis dos automóveis quer nos bancos. Este material celular é bastante durável e muito eficaz no isolamento e absorção de vibrações. Na figura 5.14 mostram-se exemplos deste material.



Figura 5.14: Exemplos de espuma de poliuretano.

Com base na resposta do material após impacto, à temperatura de 20°C, as espumas poliméricas são designadas por rígidas, se o comportamento for elasto-plástico, ou flexíveis, se for elástico. A espuma de poliuretano utilizada no âmbito deste trabalho é uma espuma com as características da mesma utilizada por Shim *et al.* [Shim 00], no estudo da resposta de uma espuma de poliuretano rígida a impacto de baixa velocidade. As propriedades desta espuma são as que se indicam na tabela 5.1, onde estão também indicadas as propriedades relativas ao material denso. O comportamento do material pode ser representado pela curva tensão-deformação representada na figura 5.15. Este modelo constitutivo pode ser definido analiticamente, por partes, de acordo com a formulação seguinte:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \text{se } \varepsilon \in [0, \varepsilon_y] & (\text{comportamento elástico}) \\ E\varepsilon_y & \text{se } \varepsilon \in [\varepsilon_y, \varepsilon_d] & (\text{comportamento plástico}) \\ E\varepsilon_y \exp \frac{a(\varepsilon - \varepsilon_d)}{(\varepsilon_1 - \varepsilon)^b} & \text{se } \varepsilon \in [\varepsilon_d, \varepsilon_1] & (\text{densificação}). \end{cases} \quad (5.1)$$

Neste modelo, E é o módulo de elasticidade da espuma de poliuretano, ε_y é a deformação para a tensão de cedência (5%), ε_d é a deformação de densificação (80%), ε_1 é a deformação máxima à compressão (95%), e a e b são constantes que definem a forma da curva. Para o material considerado neste trabalho considerou-se $a = 0.5$ e $b = 1$ [Shim 00].

Tabela 5.1: Propriedades mecânicas da espuma de poliuretano utilizadas na caracterização dos materiais.

Propriedades Mecânicas	ρ [kg/m ³]	E [MPa]	σ_y [MPa]	ν
Material Expandido	25.6 ^a	2.78 ^a	–	–
Material Denso	–	1600 ^b	127 ^b	0.44 ^c

^a [Shim 00].

^b [Gibson 97].

^c [Lakes 86].

Realizaram-se simulações numéricas com espuma de poliuretano rígida, para valores de energia cinética inicial $3 \leq E_{ci} \leq 50$ kJ. A limitação superior deste intervalo prende-se com o facto de $E_{ci} = 50$ kJ ser a energia de impacto máxima que o bloco consegue suportar sem sofrer deformações excessivas.

O gráfico da figura 5.16 representa a variação da força de reacção na parede móvel em função do tempo. Podem observar-se dois aumentos significativos da força. O primeiro corresponde ao início da compressão do material e o segundo à densificação da espuma de poliuretano. A força aumenta com o aumento da energia cinética inicial.

Na figura 5.17 estão representadas as curvas relativas à variação de aceleração do ponto de referência (ponto A, figura 4.1) para o conjunto de simulações realizadas com espuma de poliuretano, em função do tempo. Pode verificar-se que também na evolução da aceleração ao longo do tempo existem dois aumentos bruscos. Estes correspondem aos instantes em que se inicia o impacto e em que o material começa a densificar.

A variação de energia cinética da parede móvel com o tempo está representada no gráfico da figura 5.18. Verifica-se que a sua variação é muito reduzida até ao instante em que sofre uma descida brusca, até se anular. Posteriormente, a energia cinética aumenta, de forma brusca, até valores próximos da energia cinética inicial (E_{ci}).

Na figura 5.19 estão representadas as variações de energia acumulada e da força de reacção na parede móvel em função do deslocamento do ponto de referência. A variação da força é semelhante em todas as simulações numéricas realizadas. A força exibe um aumento inicial até $F \approx 5$ kN e mantém-se aproximadamente constante até um deslocamento do nó de referência $d \approx 170$ mm. Neste último instante dá-se um novo aumento brusco da força de reacção, consequência da densificação do material.

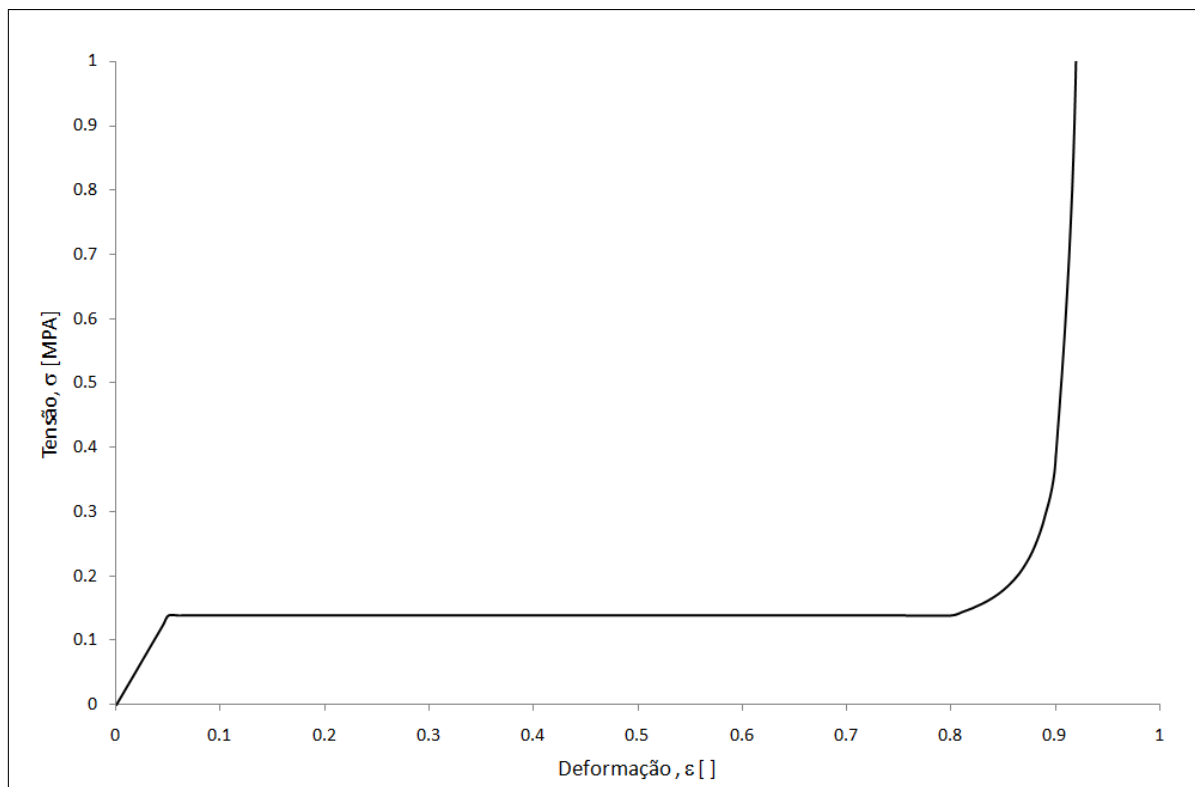


Figura 5.15: Curva de comportamento à compressão da espuma de poliuretano rígida. A escala da tensão foi truncada para facilitar a visualização do patamar de tensão. O valor máximo é $\sigma = 152.43$ MPa, correspondente a uma deformação $\epsilon = 0.94$.

A energia acumulada, por outro lado, exibe um crescimento aproximadamente linear até ao início do estágio de densificação do material seguido de um comportamento aproximadamente exponencial. Pode ainda verificar-se que, relativamente à energia cinética inicial das simulações, a energia dissipada é bastante reduzida, visto a energia acumulada final assumir valores reduzidos.

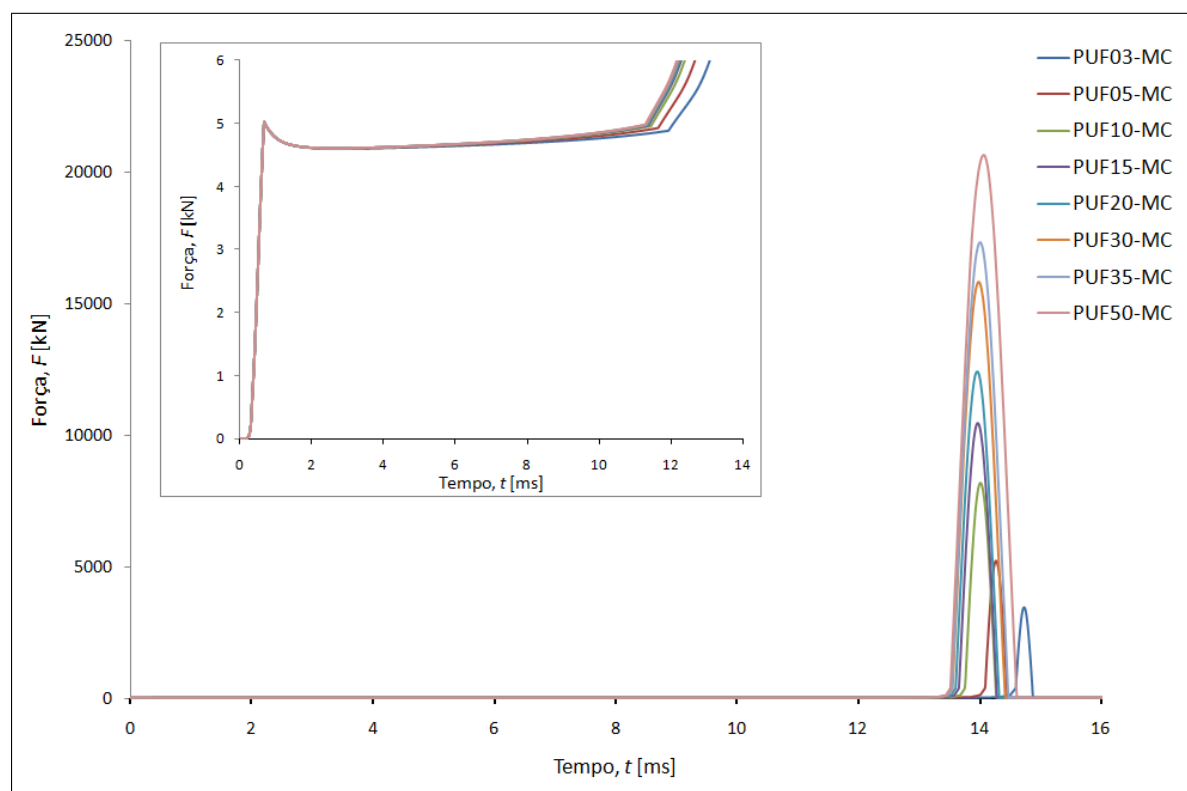


Figura 5.16: Evolução da força de reacção na parede móvel em função do tempo, para as simulações realizadas com espuma de poliuretano.

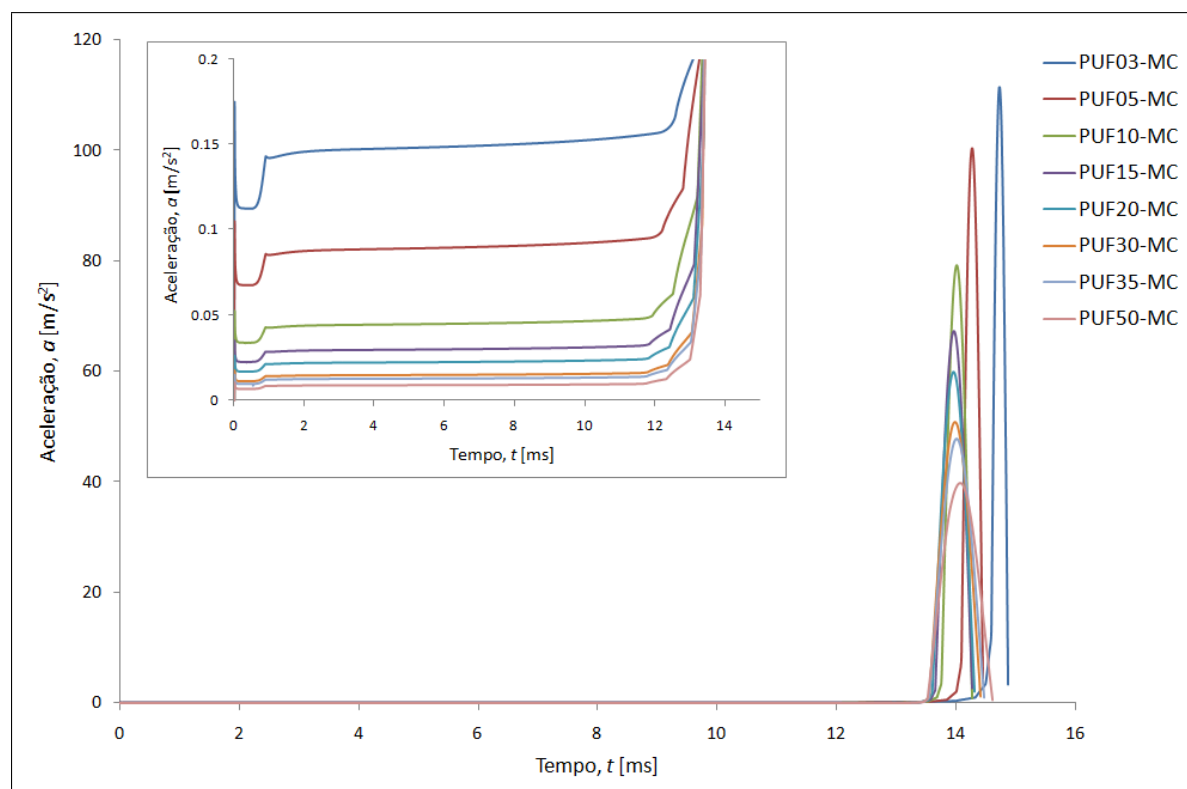


Figura 5.17: Variação da aceleração do ponto de referência (ponto A, figura 4.1) em função do tempo, para as simulações realizadas com espuma de poliuretano.

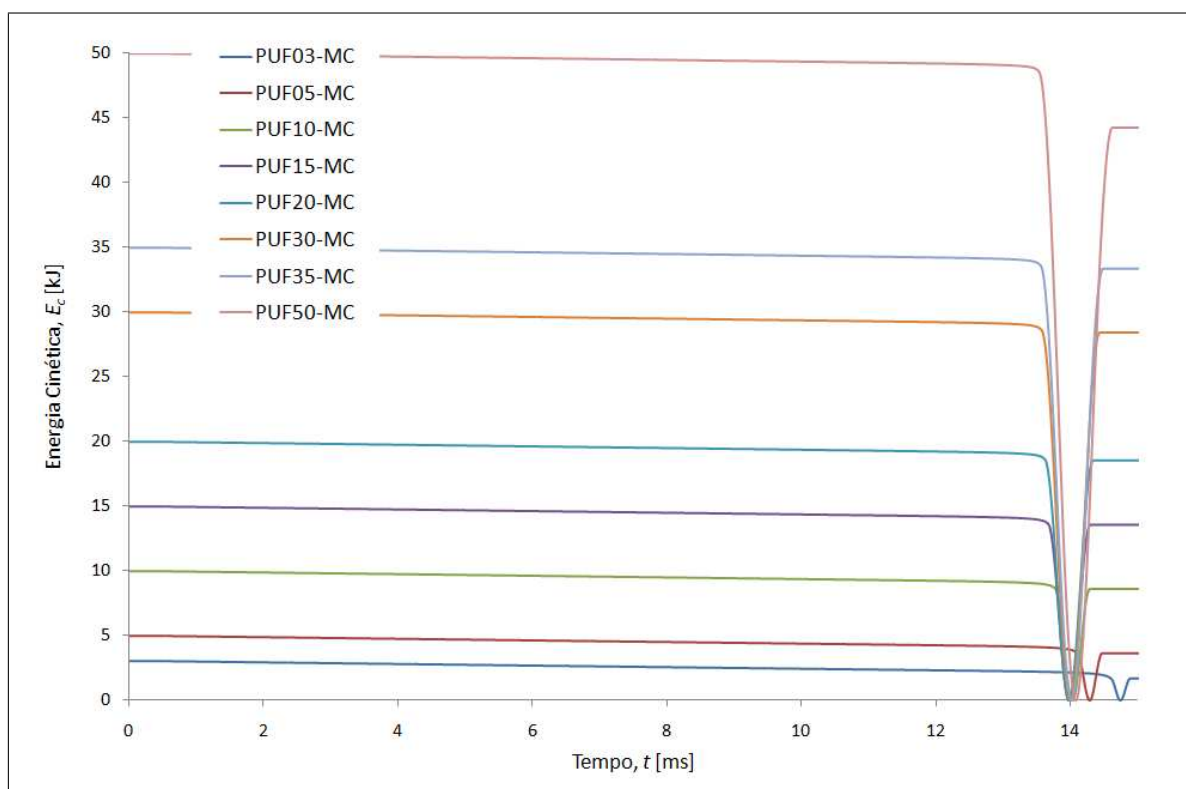


Figura 5.18: Evolução da energia cinética da parede móvel em função do tempo, para as simulações realizadas com espuma de poliuretano.

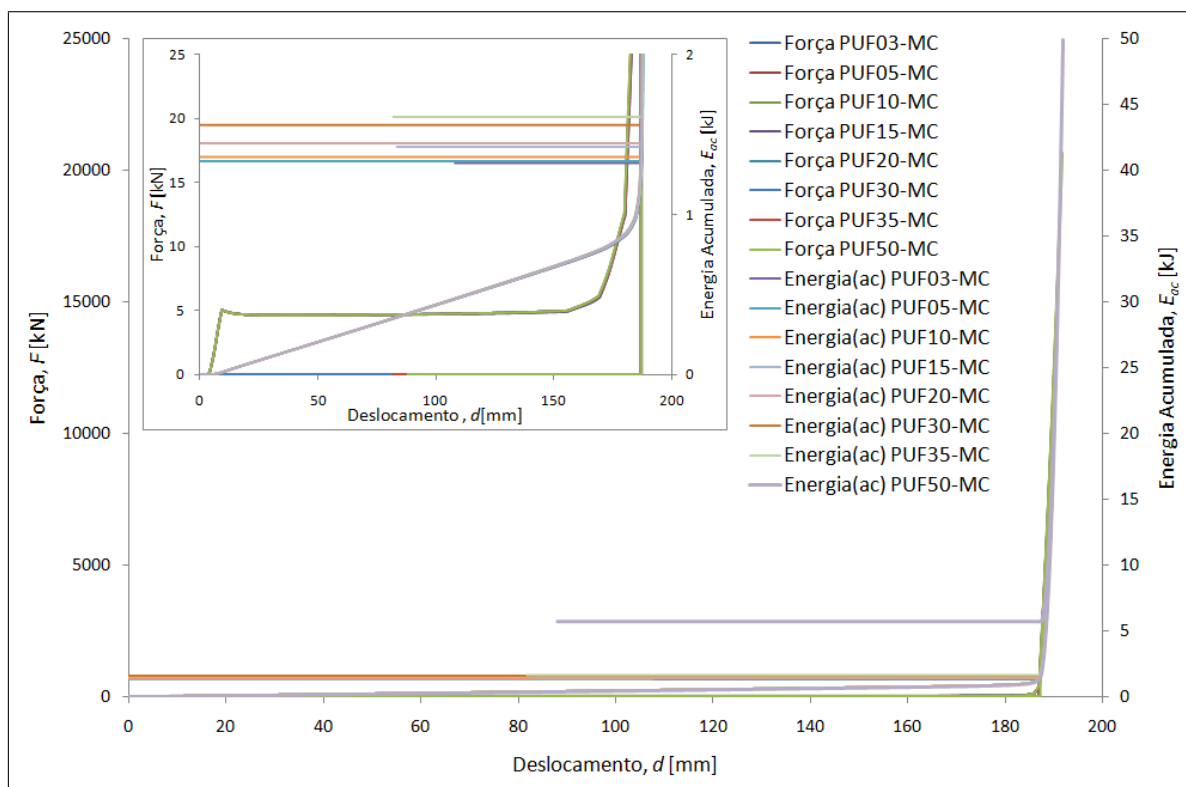


Figura 5.19: Variação da energia acumulada e da força de reacção na parede móvel em função do deslocamento do ponto de referência (ponto A, figura 4.1), para as simulações realizadas com espuma de poliuretano.

5.4 Comportamento mecânico da cortiça micro-aglomerada

A cortiça é um material celular complexo com propriedades pouco exploradas ou mesmo desconhecidas. A cortiça reúne um conjunto de propriedades notável, devido à sua baixa densidade, estabilidade química e resiliência, impermeabilidade a líquidos e gases e resistência ao fogo e ao desgaste. É também um material natural, ecológico, higiênico, de fácil manutenção e com alta durabilidade. É por estes motivos que a cortiça é utilizada nos dias de hoje como material para isolamento acústico e térmico, absorção de vibrações, como vedante e como material de absorção de energia em pavimentos, calçado e embalagem, entre outros. Consequentemente, é também uma alternativa potencial em aplicações automóveis para segurança passiva. Na figura 5.20 está representada uma amostra de folhas de cortiça.



Figura 5.20: Exemplos de folhas de cortiça micro-aglomerada.

A cortiça na forma micro-aglomerada permite obter propriedades muito mais homogêneas e pode ser fabricada industrialmente com dimensões e geometrias muito mais variadas que a cortiça natural. No âmbito deste trabalho, foi utilizado micro-aglomerado composto de cortiça, o mesmo utilizado por Gameiro [Gameiro 07a]. Segundo Gameiro, trata-se do micro-aglomerado mais fácil de encontrar no mercado, constituído por partículas de cortiça e um adesivo. Este é produzido com os granulados de melhor qualidade, resultantes da trituração dos sub-produtos da produção de rolhas e discos naturais e de bocados e refugos da cortiça amadia. A cortiça micro-aglomerada é constituída por partículas de cortiça com dimensões variáveis entre 0.5 e 2 mm, misturadas em parafina, látex, óleo parafínico e cola à base de poliuretano (resina sintética termoplástica).

O fabrico deste micro-aglomerado é feito através da envolvência do granulado de cortiça com o adesivo misturado com solvente ou plastificante, com o auxílio de um

pulverizador de aspersão. A velocidade de rotação da mistura é controlada de forma a minimizar a fricção entre os grânulos de cortiça. Esta mistura é posteriormente enviada por pistões para a câmara de aquecimento, onde se dá a cura do adesivo, para posterior extrusão de forma a produzir rolhas de micro-aglomerado composto.

As características e propriedades mecânicas do micro-aglomerado de cortiça estão indicadas na tabela 5.2. A curva de comportamento tensão-deformação do mesmo é representada no gráfico da figura 5.21 [Gameiro 07a].

Tabela 5.2: Propriedades mecânicas da cortiça micro-aglomerada utilizadas na caracterização dos materiais [Gameiro 07a].

Propriedades Mecânicas	ρ [kg/m ³]	E [MPa]	σ_y [MPa]	ν
Material Expandido	293	15	–	–
Material Denso	–	9000	1	0.30

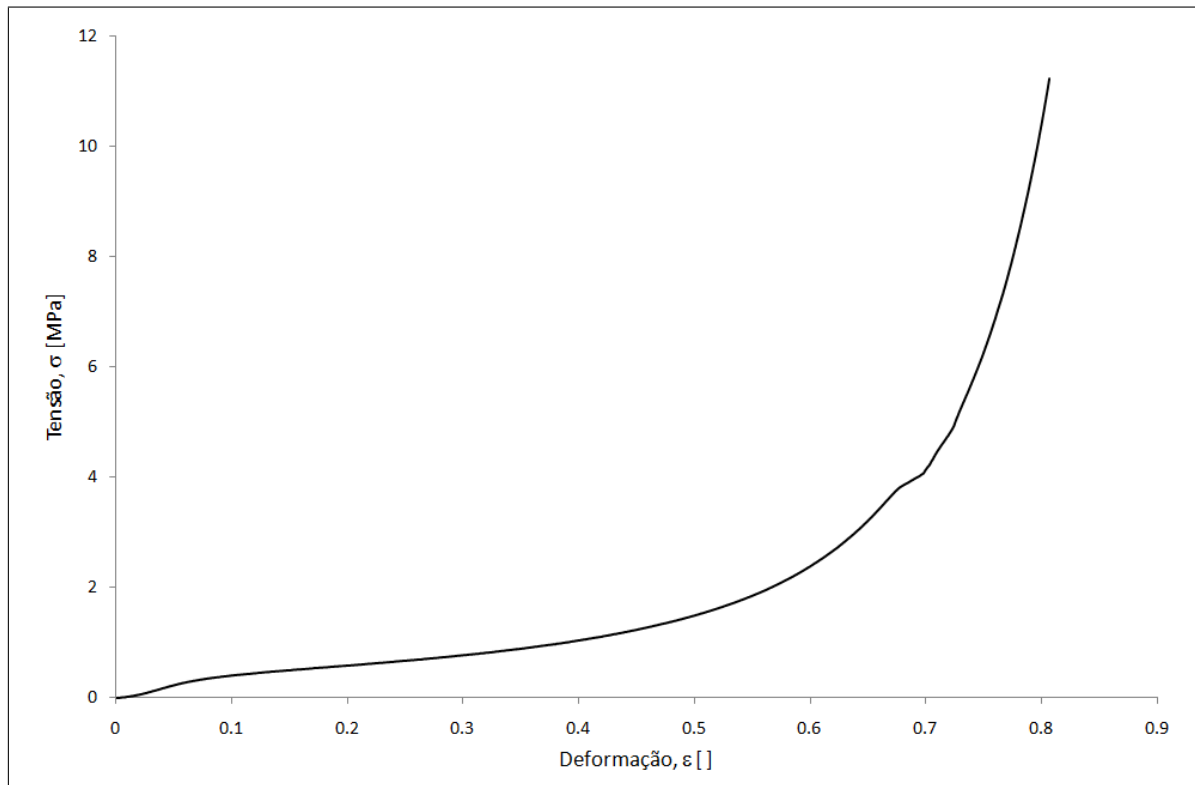


Figura 5.21: Comportamento à compressão da cortiça micro-aglomerada [Gameiro 07a].

No âmbito deste trabalho, realizaram-se simulações numéricas sobre o bloco de micro-aglomerado de cortiça com energia cinética inicial $3 \leq E_{ci} \leq 35$ kJ, uma vez que, para valores de energia cinética inicial superiores a 35 kJ, o bloco sofre deformações excessivas.

Na figura 5.22 estão representadas as curvas que descrevem a variação da força de reacção na parede móvel ao longo da duração do ensaio, obtidas a partir das simulações numéricas realizadas com o bloco de micro-aglomerado de cortiça. Pode observar-se

que, inicialmente, para $t \leq 5$ ms, a força varia de modo semelhante para todas as simulações de impacto. Para tempos superiores ($t > 5$ ms) verifica-se que, com o aumento da energia envolvida, aumenta também a taxa de crescimento da força de reacção, atingindo valores máximos mais elevados.

A evolução da aceleração do ponto de referência (ponto A, figura 4.1) em função do tempo está representada no gráfico da figura 5.23. Pode observar-se que, numa fase inicial, a aceleração é mais elevada para os casos em que a energia cinética inicial é menor, sendo decrescente para valores crescentes de E_{ci} . Posteriormente, esta situação inverte-se, e os valores de aceleração aumentam de modo relativamente brusco com a energia cinética inicial. Tal se deve ao aumento gradual da densificação do material, mostrando assim picos mais elevados de aceleração para maiores valores de energia cinética inicial.

O estudo da evolução da energia cinética da parede móvel com o tempo pode ser feita através da análise dos resultados do gráfico da figura 5.24. Como seria de esperar, verifica-se um decréscimo desta energia com o tempo. Para valores de E_{ci} superiores este decréscimo é mais evidente. Para todas as simulações realizadas verifica-se a existência de energia residual, apesar de pouco evidente. A existência de energia residual é constatada através do crescimento da energia até estabilização, após a anulação da mesma.

Na figura 5.25 está representada a evolução da energia acumulada e da força de reacção em função do deslocamento do ponto de referência. Ambas estas grandezas dependentes variam de modo semelhante em todas as simulações realizadas, atingindo valores máximos mais elevados para E_{ci} mais elevadas e para deslocamentos do ponto de referência superiores, ou seja, quando há maior deformação do material. Adicionalmente, pode observar-se a existência de um valor residual de energia, através do retorno das variáveis após atingir o valor máximo de deslocamento do ponto de referência para cada simulação.

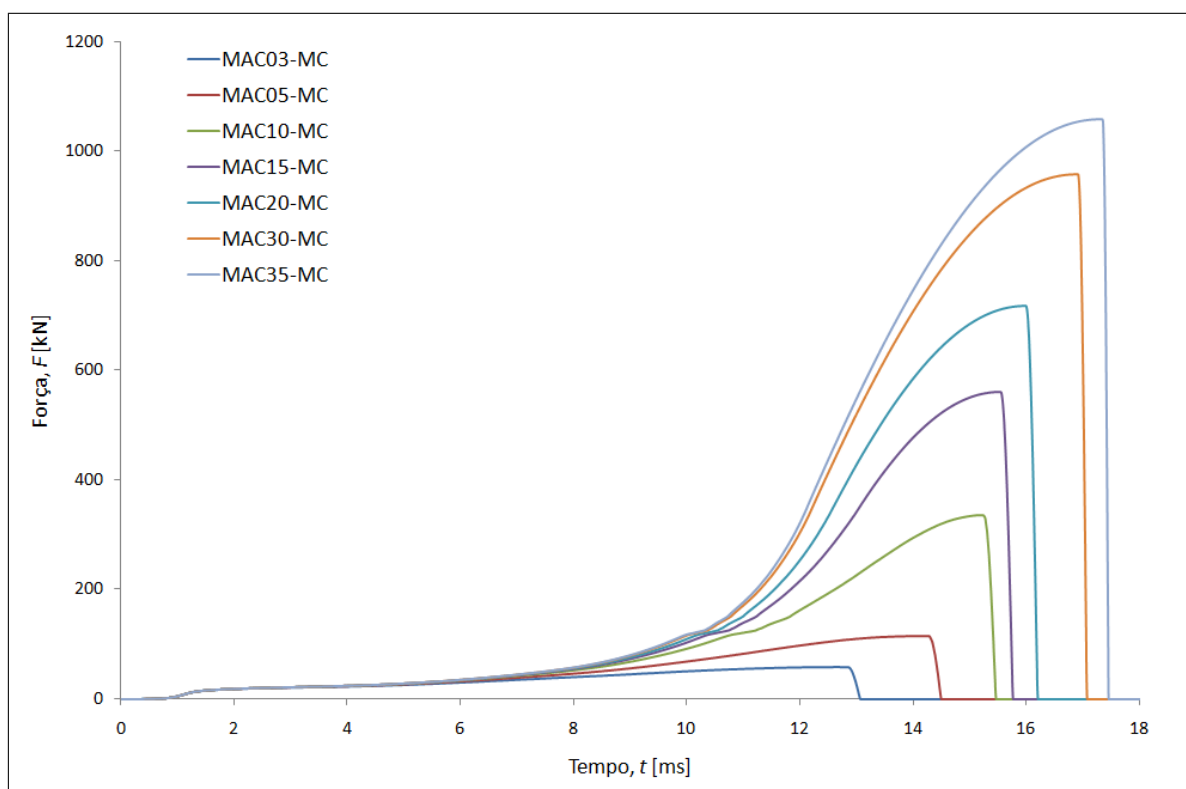


Figura 5.22: Variação da força de reacção da parede móvel em função do tempo, para as simulações realizadas com cortiça micro-aglomerada.

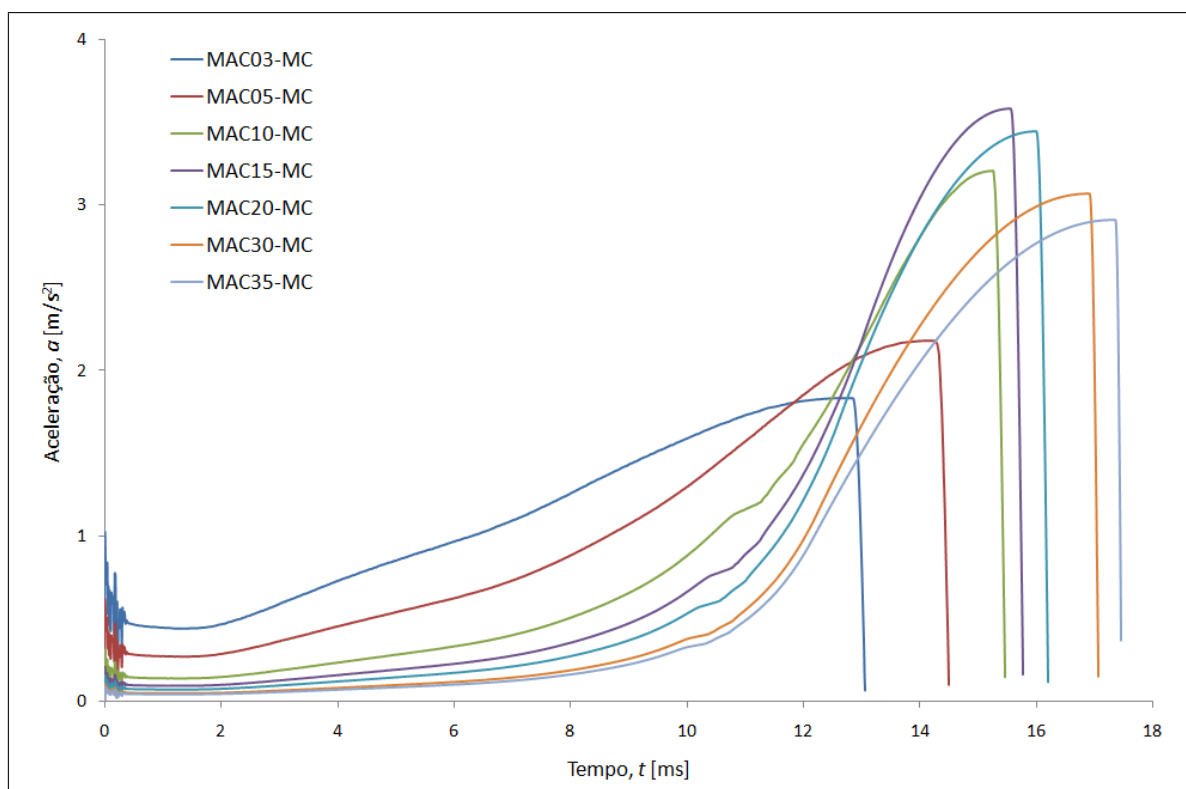


Figura 5.23: Variação da aceleração do ponto de referência (ponto A, figura 4.1) em função do tempo, para as simulações realizadas com cortiça micro-aglomerada.

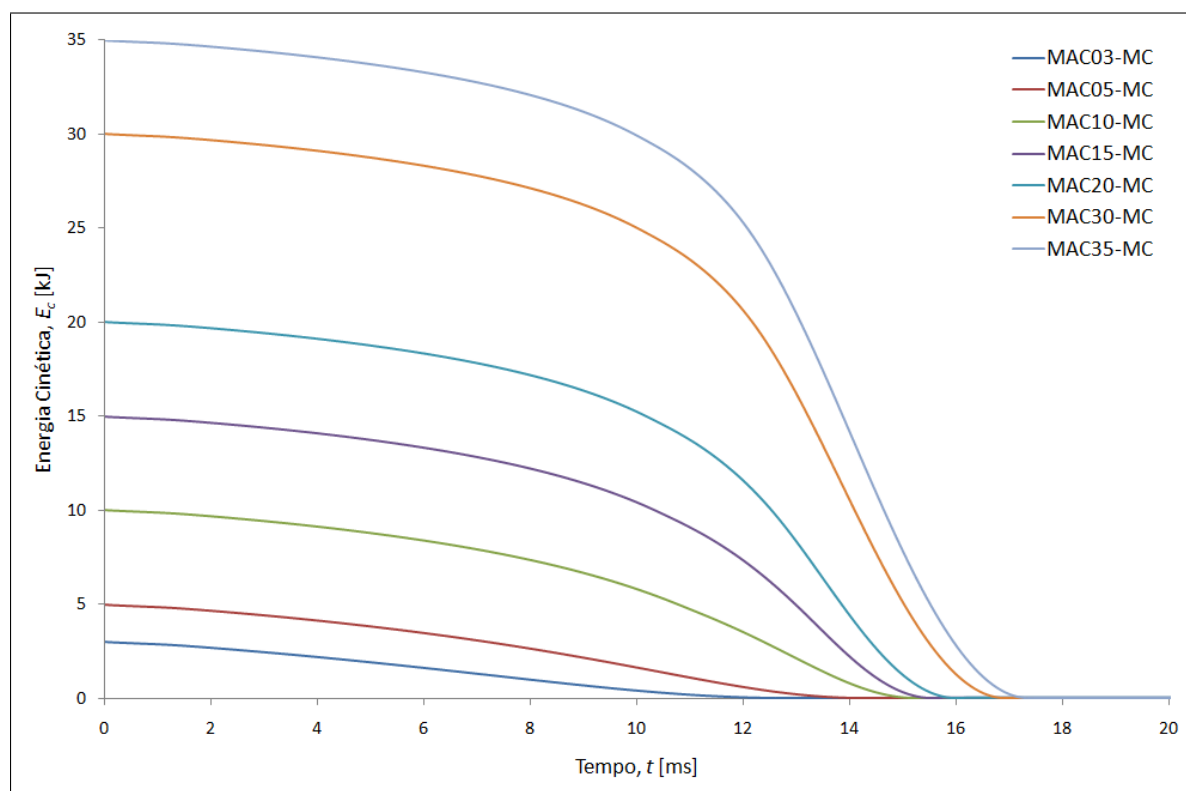


Figura 5.24: Variação da energia cinética da parede móvel em função do tempo, para as simulações realizadas com cortiça micro-aglomerada.

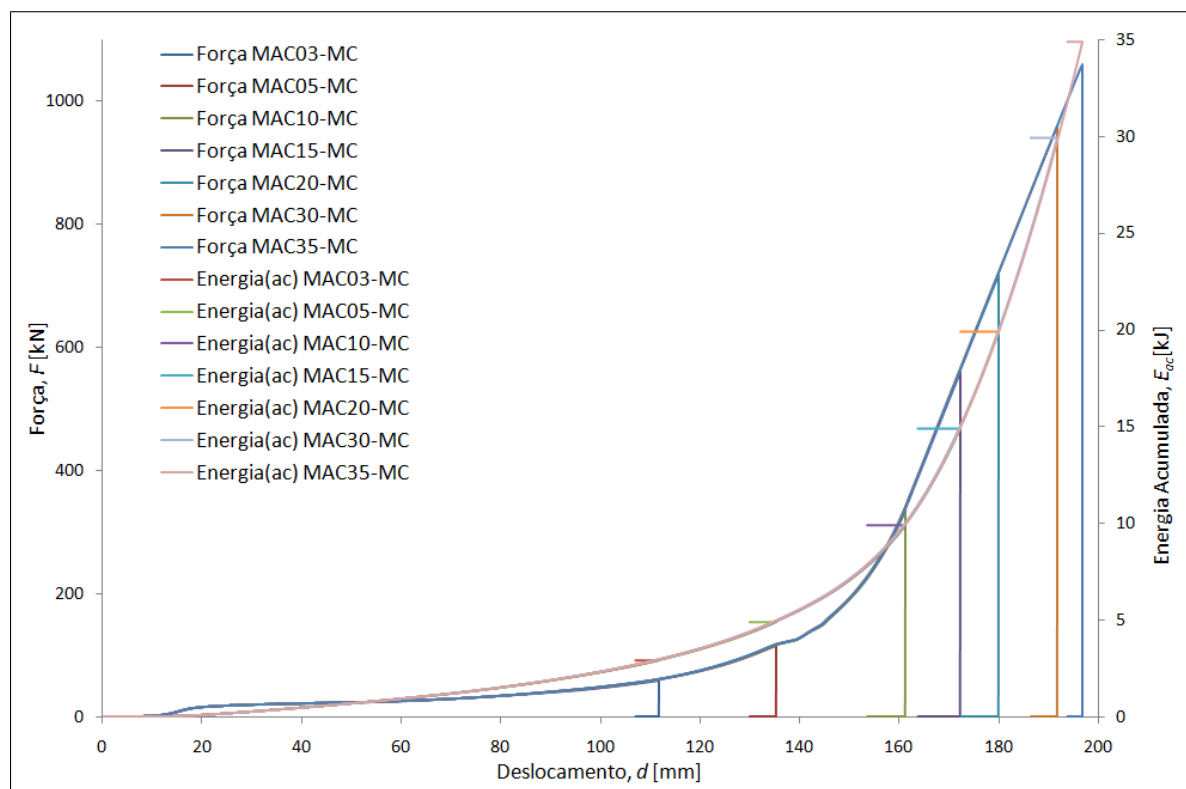


Figura 5.25: Evolução da energia acumulada e da força de reacção na parede móvel em função do deslocamento do ponto de referência (ponto A, figura 4.1), para as simulações realizadas com cortiça micro-aglomerada.

Capítulo 6

Resultados e Discussão

Nesta secção do trabalho são confrontados e discutidos os resultados obtidos através da realização de simulações numéricas para os diferentes materiais utilizados. São considerados os factores relevantes em termos de absorção de energia de impacto em situações de colisão automóvel, nomeadamente a absorção de energia, o pico de aceleração e a intrusão no habitáculo do ocupante.

Nas secções seguintes apresenta-se uma análise comparativa detalhada da capacidade de absorção de energia de impacto, em termos absolutos e específicos, para todos os materiais estudados no âmbito deste trabalho e em toda a gama de energias analisadas.

6.1 Capacidade de absorção de energia

No gráfico da figura 6.1 apresentam-se os resultados relativos à quantidade de energia absorvida em função da energia cinética inicial do impacto, E_{ci} . Estes resultados são obtidos calculando a diferença entre a energia acumulada final pela parede móvel, E_{ac} , e a energia cinética inicial, E_{ci} , da mesma parede. Do ponto de vista de energia transmitida ao ocupante do automóvel, o comportamento ideal seria uma função linear com declive igual a 1, ou seja, em que $E_a = E_{ci}$. Este comportamento corresponde à absorção total da energia de impacto pelo bloco. Como se pode verificar pelos resultados apresentados na figura 6.1, o IMPAXXTM300, a espuma de Alumínio e a cortiça micro-aglomerada apresentam um comportamento bastante aproximado ao ideal, para valores de $E_{ci} < 30$ kJ.

No entanto, para $E_{ci} \geq 30$ kJ, a cortiça micro-aglomerada continua a exibir o mesmo comportamento aproximadamente linear, enquanto que a espuma de Alumínio apresenta uma ligeira redução no declive da curva. Deste modo, a cortiça micro-aglomerada é o material que apresenta melhor comportamento global em termos de absorção de energia. Por outro lado, a espuma de poliuretano é o material que menos energia consegue absorver para qualquer das simulações realizadas. Analisando os resultados do gráfico da figura 6.1 pode verificar-se que a energia absorvida pelo bloco é aproximadamente constante em toda a gama de valores de energia de impacto estudados.

Consequentemente, de entre os materiais celulares estudados, este é o que se mostra menos vantajoso em termos de absorção de energia.

No gráfico da figura 6.2 está representada a energia absorvida por unidade de massa – energia absorvida específica, E_{as} – para cada material, em função da energia cinética inicial do impacto, E_{ci} . Como se pode verificar através da análise destes resultados, a capacidade de absorção de energia específica da espuma de poliuretano mantém-se aproximadamente constante para valores de energia cinética inicial $E_{ci} < 50$ kJ. Para $E_{ci} = 50$ kJ a capacidade de absorção de energia aumenta cerca de três vezes.

Os restantes materiais testados apresentam uma variação aproximadamente linear da energia absorvida específica com a energia cinética inicial do impacto. Porém, o declive destas variações lineares é fortemente dependente do material em causa. O IMPAXXTM é, em todas as simulações numéricas realizadas, o material que apresenta valores mais elevados de energia absorvida específica, E_{as} . A espuma de poliuretano, para valores de $E_{ci} \leq 15$ kJ, apresenta melhor capacidade de absorção de energia (específica) do que os restantes materiais. Para $15 < E_{ci} \leq 35$ kJ, a cortiça micro-aglomerada apresenta valores de energia absorvida específica mais elevados do que as espumas de Alumínio e de poliuretano. Finalmente, a espuma de Alumínio é o material que apresenta os valores mais reduzidos de energia absorvida por unidade de massa de material denso, para todas as simulações analisadas, excepção feita aos casos em que $E_{ci} = 30$ kJ e $E_{ci} = 35$ kJ, em que a espuma de poliuretano apresenta valores mais reduzidos.

6.1.1 Índice de desempenho de absorção de energia

Em termos de absorção de energia, é importante, além da quantidade de energia absorvida por cada material distinto, o modo como esta é absorvida. Em situação de colisão automóvel é muito importante que os processos de absorção e dissipação de energia ocorram de forma gradual e, sempre que possível, controlada.

Numa tentativa de quantificar o modo de absorção de energia propõe-se, no âmbito deste trabalho, o cálculo de um *índice de desempenho* de absorção de energia que permita distinguir os diversos materiais. Este índice facilitará ainda o processo de selecção de materiais para aplicações específicas de impacto e de análise de *crashworthiness*.

Para calcular este índice, avalia-se a velocidade de variação de absorção de energia em todas as situações de impacto estudadas neste trabalho. Para este efeito propõe-se recorrer à seguinte expressão:

$$E = E(t^n) = E_c^{\min,n} + (E_c^{\max,n} - E_c^{\min,n}) \left[\frac{\exp\left(\lambda \frac{t^n - t^{\max,n}}{t^{\min,n} - t^{\max,n}}\right) - 1}{\exp(\lambda) - 1} \right], \quad (6.1)$$

em que $E = E(t^n)$ representa a função analítica da energia absorvida no tempo, E_c é a energia cinética da parede móvel, t é o tempo e o índice n indica que os valores respectivos são normalizados. O valor adimensional λ é designado por *factor de forma* da curva.

De forma a facilitar a visualização da evolução da energia absorvida em função do tempo apresentam-se, no gráfico da figura 6.3, as curvas obtidas através da formulação analítica indicada na equação 6.1 para diferentes valores de λ .

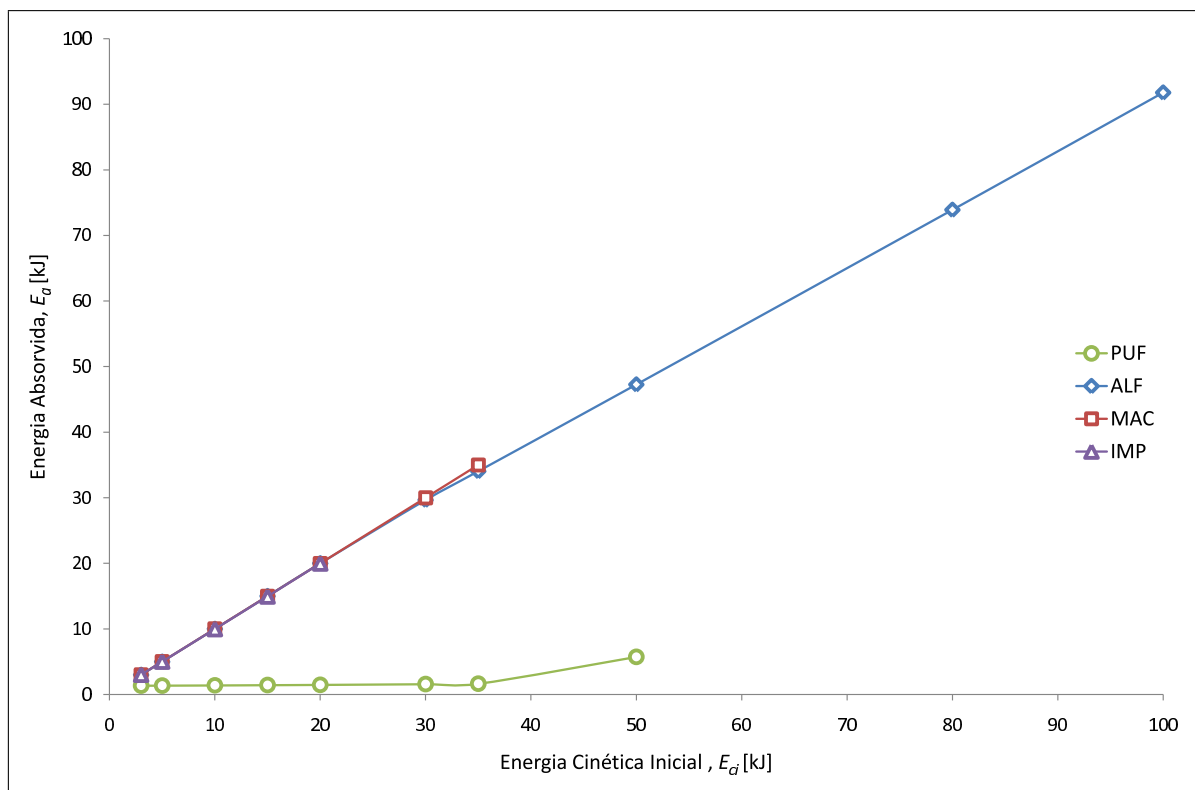


Figura 6.1: Análise comparativa da energia absorvida por todos os materiais para as gamas de energia de impacto estudadas.

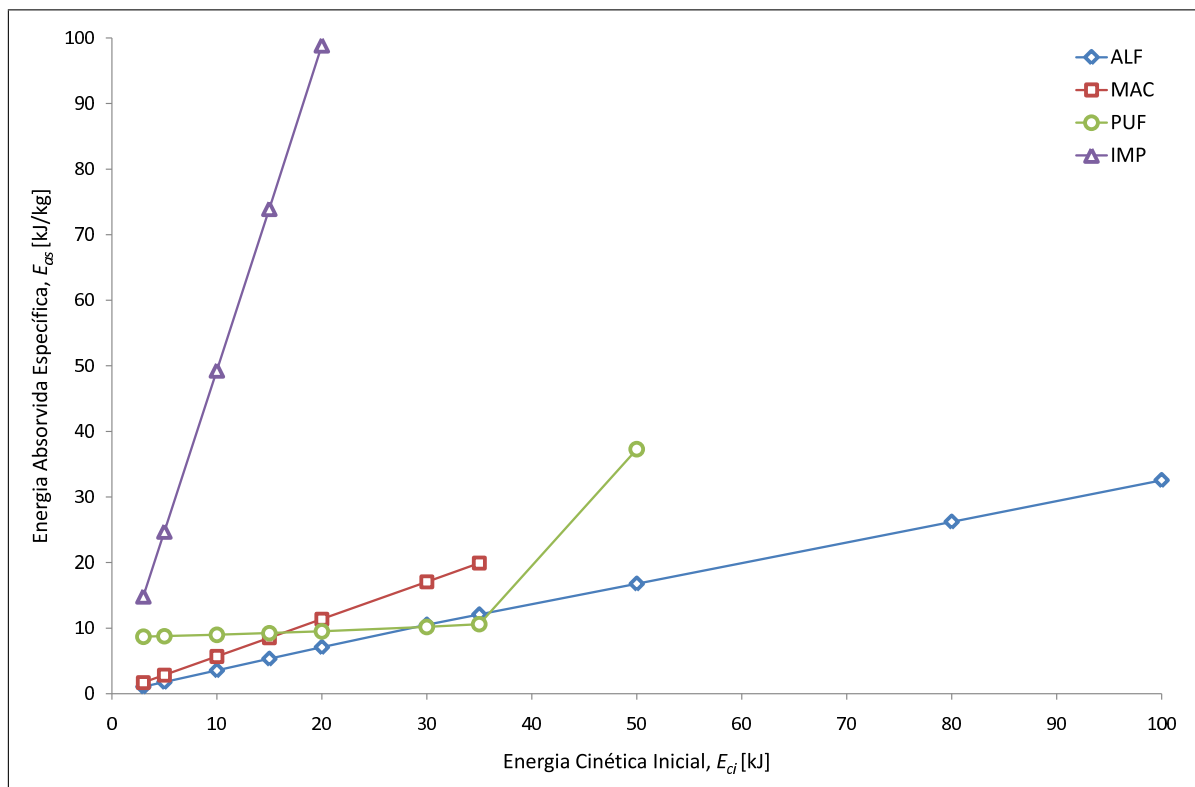


Figura 6.2: Análise comparativa da energia absorvida por unidade de massa para todos os materiais para as gamas de energia de impacto estudadas.

Nos casos em que $\lambda \gg 0$ a absorção de energia dá-se, preferencialmente, nos instantes iniciais do impacto. Por outro lado, se $\lambda \ll 0$ a absorção de energia dá-se essencialmente nos momentos finais do choque. Em qualquer uma destas situações, no caso de impacto automóvel, vão desenvolver-se acelerações bruscas prejudiciais aos ocupantes do veículo. Consequentemente, e como se pode verificar pela análise de $E(t^n)$, conclui-se que o comportamento ideal em termos de absorção de energia será um comportamento em que $\lambda \approx 0$. Na figura 6.4 estão representadas algumas curvas obtidas com a função analítica da energia absorvida no tempo, em correspondência com o factor de forma λ .

De forma a simplificar a análise qualitativa do desempenho de absorção de energia de cada material, designa-se ϕ como o *índice de desempenho* de absorção de energia do material. Este índice adimensional é dado pela relação

$$\phi = \frac{1}{1 + |\lambda|}. \quad (6.2)$$

Assim, considerando que o comportamento ideal do bloco em termos de velocidade de absorção de energia é representado por uma função $E(t^n)$ linear e com declive igual a -1 , isto é, com $\lambda \approx 0$, o material apresentará melhor comportamento quanto mais elevado for o índice de desempenho ϕ . No gráfico da figura 6.5 apresenta-se a variação do índice de desempenho para todos os materiais estudados no âmbito deste trabalho, em função da energia cinética inicial de impacto.

Como se pode verificar, recorrendo ao índice de desempenho proposto neste trabalho, a cortiça micro-aglomerada é o material com os valores de ϕ mais elevados para as energias de impacto $E_{ci} \leq 10$ kJ. Por outro lado, para $E_{ci} > 10$ kJ torna-se evidente que o material mais eficiente em termos de absorção de energia é a espuma de Alumínio. Em todas as situações estudadas, quer o IMPAXXTM quer a espuma de poliuretano têm desempenhos claramente inferiores.

No gráfico da figura 6.6 está representada a variação do valor máximo de aceleração do ponto de referência (ponto A, figura 4.1) em função da energia cinética inicial do impacto, para todas as simulações numéricas realizadas com os quatro materiais estudados. Através da análise destes resultados pode observar-se que a espuma de poliuretano apresenta, em todos os casos estudados no âmbito deste trabalho, uma aceleração de pico consideravelmente superior a qualquer um dos restantes materiais, apesar de decrescer com o aumento da energia cinética do choque. Tal se deve ao facto de o poliuretano ser um material em que a variação de energia de impacto se dá, preferencialmente, nos instantes finais do processo de choque. Consequentemente, e de acordo com as expressões 6.1 e 6.2, este material exhibe valores do índice de desempenho muito reduzidos, como se pode verificar pelos resultados apresentados na figura 6.5.

Por outro lado, para $E_{ci} = 3$ kJ o IMPAXXTM é o material que apresenta o pico de aceleração mais reduzido. No entanto, para os restantes valores de energia, este é superior aos valores apresentados quer pela espuma de Alumínio quer pelo micro-aglomerado de cortiça. Assim, do ponto de vista dos valores máximos de aceleração, a espuma de Alumínio e o micro-aglomerado de cortiça são os materiais que melhor comportamento apresentam para $5 \leq E_{ci} \leq 35$ kJ.

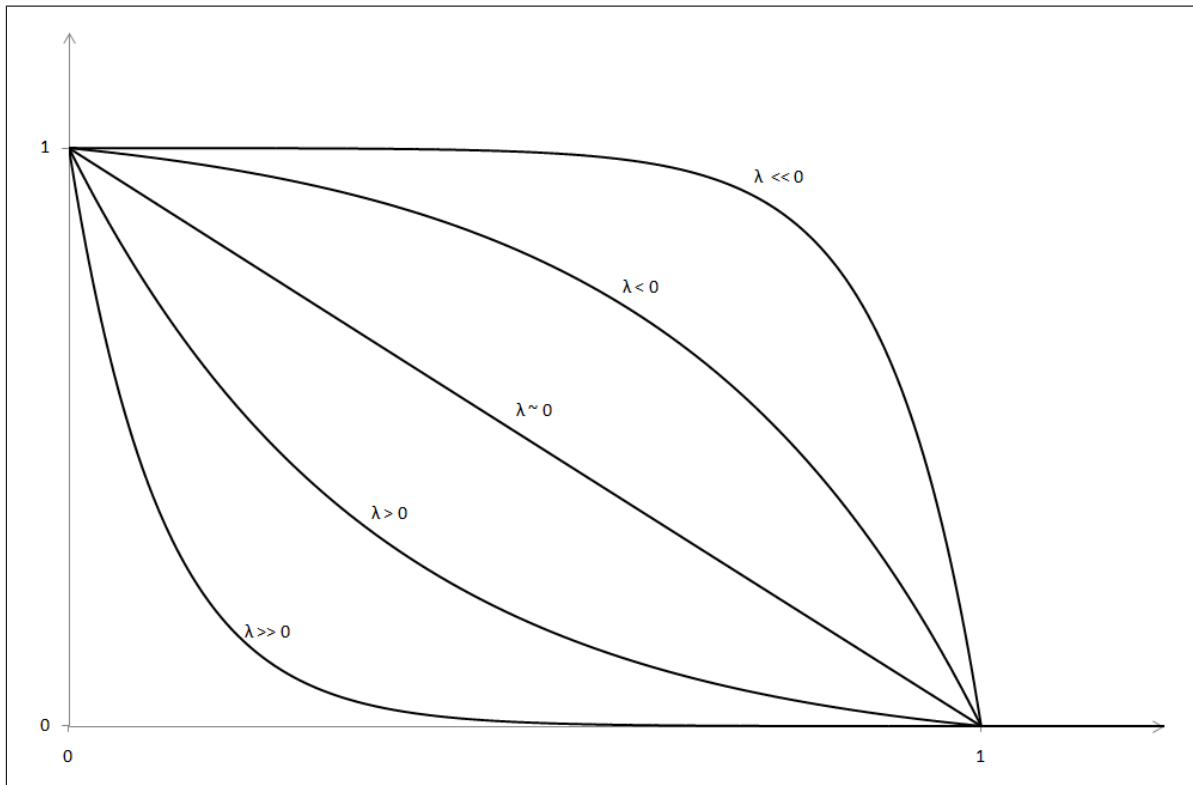


Figura 6.3: Variação de absorção de energia em função do tempo para diferentes valores de λ .

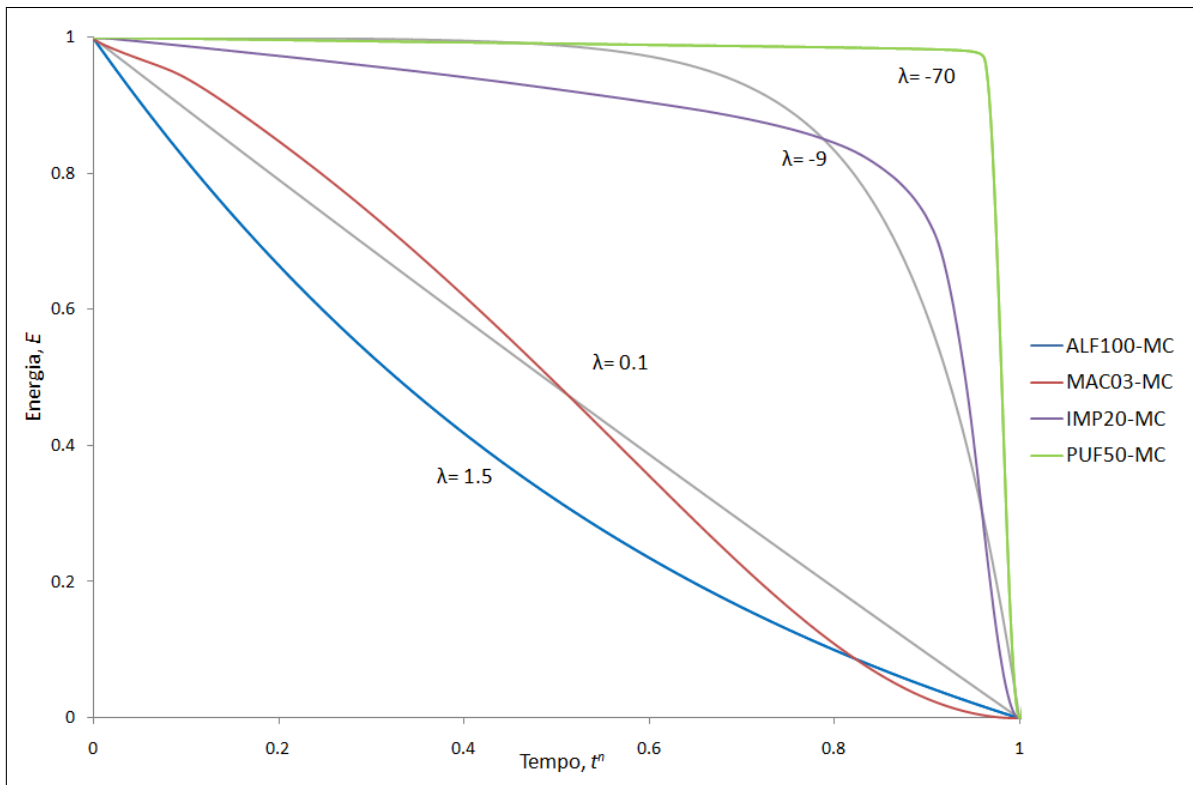


Figura 6.4: Exemplo de curvas obtidas com a função analítica da energia absorvida no tempo e respectivas curvas obtidas numericamente consoante o factor de forma λ . As curvas numéricas são representadas a cinzento, estando algumas sobrepostas pelas curvas analíticas.

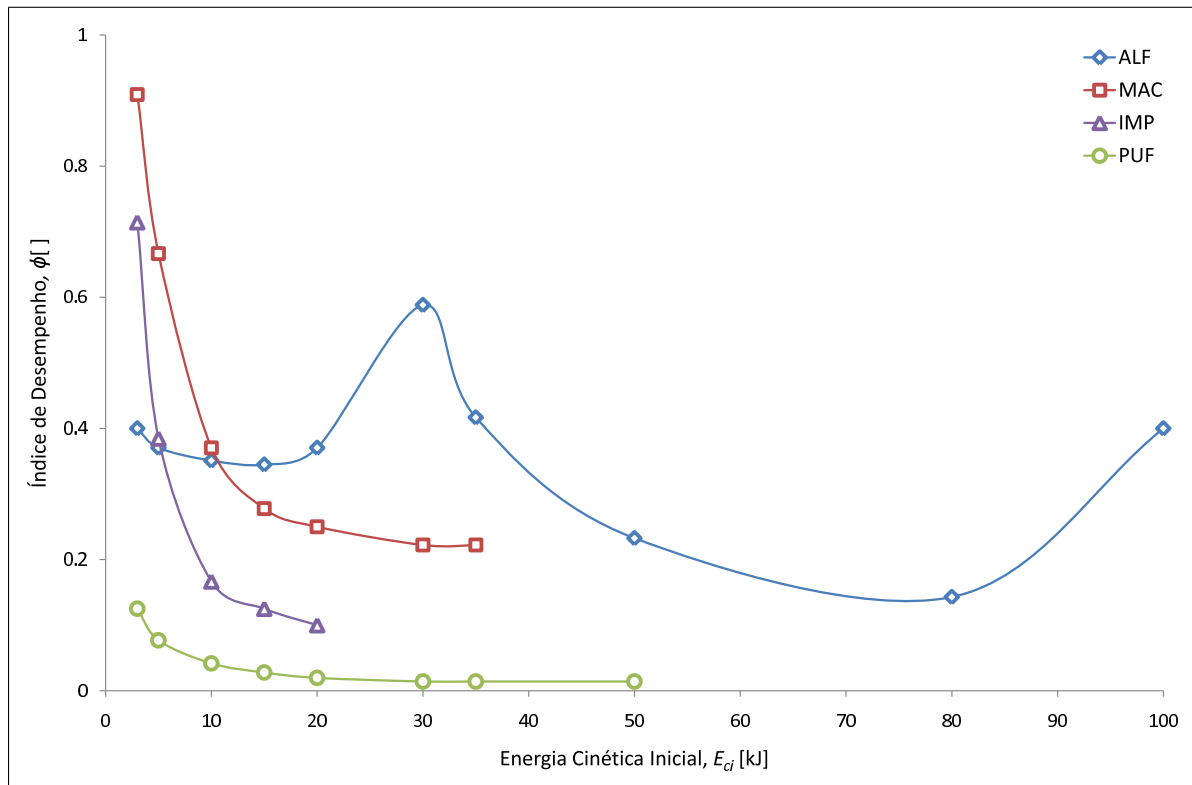


Figura 6.5: Variação do índice de desempenho de absorção de energia de cada material em função da energia cinética inicial de impacto.

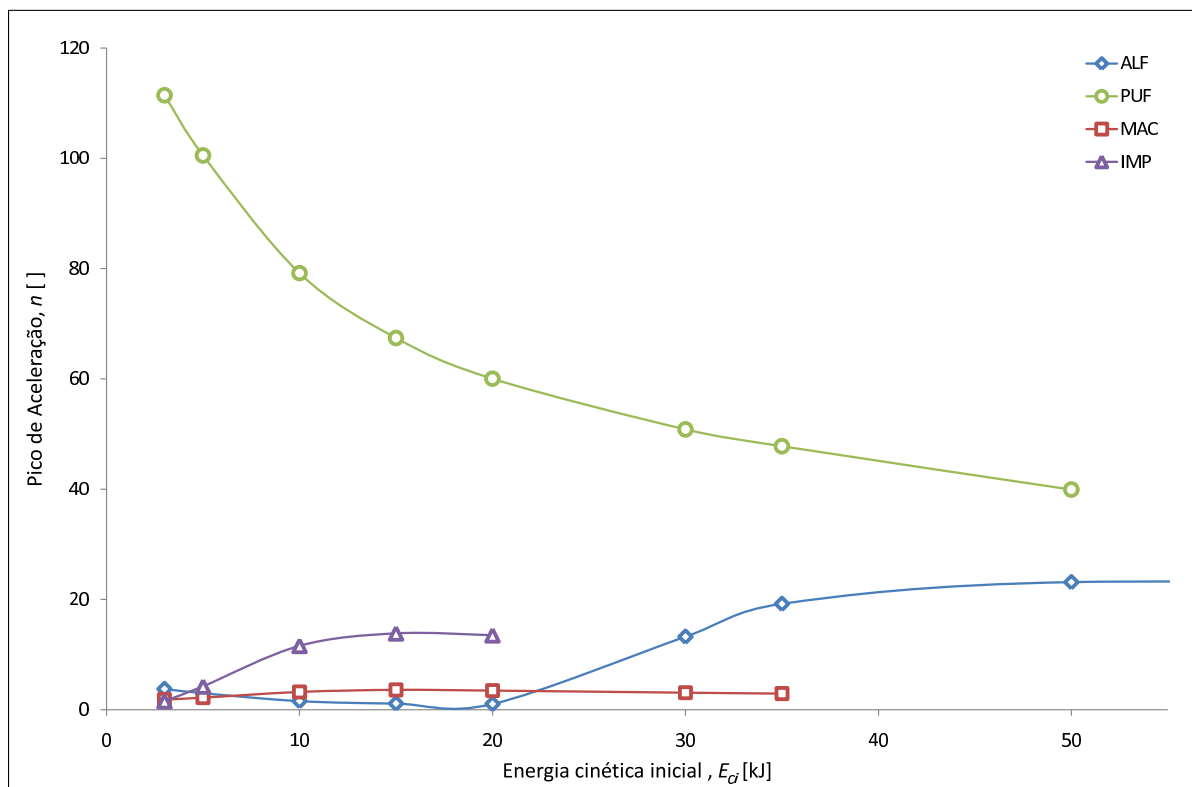


Figura 6.6: Variação da aceleração máxima do ponto de referência (ponto A, figura 4.1), em múltiplos da aceleração da gravidade, em função da energia cinética inicial do choque. O eixo da energia cinética inicial foi truncado para facilitar a visualização. A curva corresponde à espuma de Alumínio mantém o comportamento até $E_{ci} = 100$ kJ.

6.2 Análise da intrusão

Um dos factores mais importantes no que diz respeito à segurança passiva automóvel, é a determinação da intrusão no habitáculo do veículo. Por este motivo, analisa-se no âmbito deste trabalho, o deslocamento relativo¹ máximo do ponto de referência (ponto A, figura 4.1) na direcção normal à parede fixa.

No gráfico da figura 6.7 representa-se o valor máximo de compressão do bloco (valor máximo do deslocamento relativo do ponto de referência) em função da energia cinética inicial do impacto. Como se pode verificar, a espuma de poliuretano apresenta valores de compressão máxima aproximadamente independentes do valor da energia cinética do choque, E_{ci} . Adicionalmente, estes valores são relativamente próximos de 95%. Por outro lado, os restantes materiais estudados apresentam valores crescentes da compressão máxima com o aumento da energia cinética inicial. Observa-se ainda que, quer para a espuma de Alumínio quer para o IMPAXXTM300, a compressão máxima atingida pelo bloco tende para um valor constante. Em termos relativos, destacam-se os comportamentos do IMPAXXTM300, da espuma de Alumínio e da cortiça micro-aglomerada, que apresentam comportamentos semelhantes, sendo a espuma de Alumínio o material que apresenta valores de compressão mais reduzidos, seguida da cortiça micro-aglomerada e, finalmente, o IMPAXXTM300, com valores de compressão máxima muito próximos de 100%, isto é, da compressão total do bloco.

Face aos resultados apresentados e discutidos nos parágrafos anteriores, pode prever-se que, em termos de intrusão, o material mais conveniente será a espuma de alumínio, seguido da cortiça micro-aglomerada. No que diz respeito a este parâmetro de análise, deve ainda concluir-se que a espuma de poliuretano é um material a evitar.

¹ Em relação à altura inicial do bloco (ver figura 4.1).

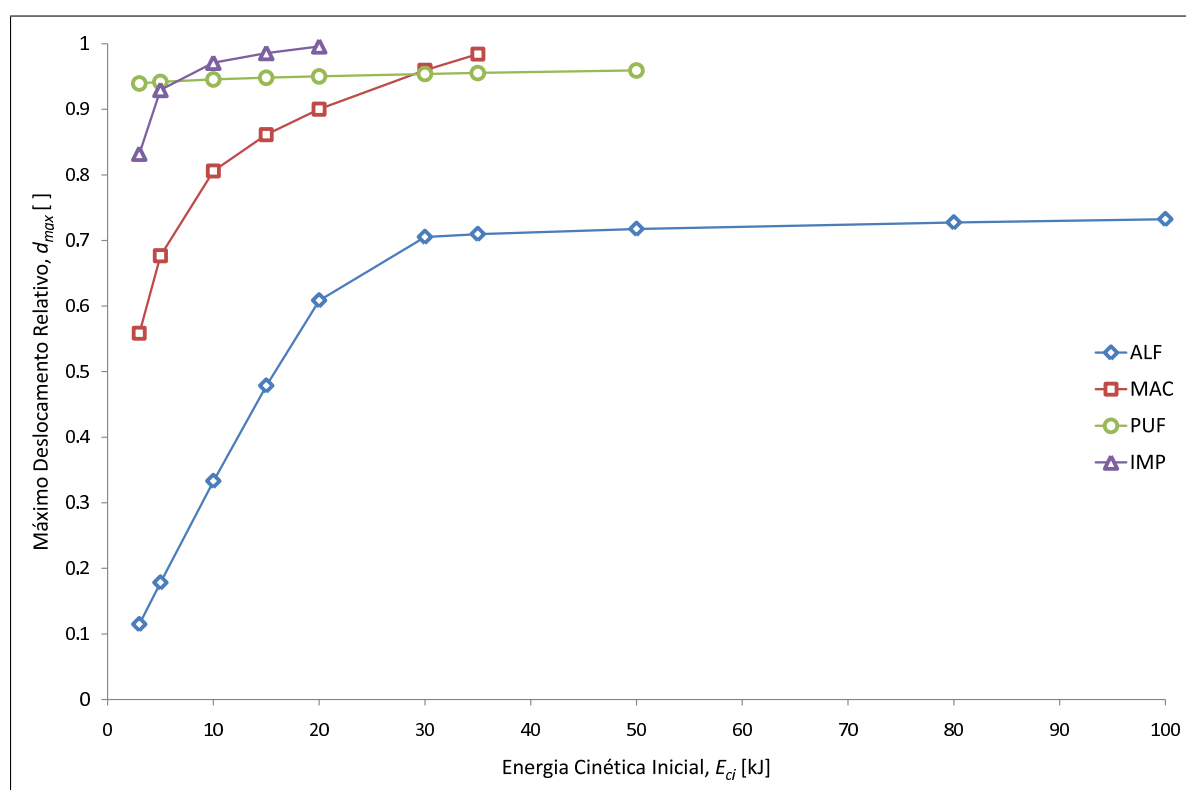


Figura 6.7: Deslocamento máximo do ponto de referência (ponto A, figura 4.1) em função da energia cinética inicial do choque.

Parte III

Modelação Numérica

Capítulo 7

Procedimentos e Métodos

Neste capítulo desenvolve-se um sistema concreto para protecção contra impacto lateral em veículos automóveis, através da inclusão de *padding*s de cortiça micro-aglomerada nas portas laterais. Descreve-se o modelo utilizado para a realização de simulações numéricas de impacto lateral, em LS-DynaTM, e explicam-se os métodos utilizados no processo de simplificação do modelo.

Nesta parte do trabalho propõe-se um sistema concreto para protecção dos ocupantes em situação de impacto lateral em veículos automóveis, com a incorporação de cortiça. O sistema proposto consiste na inclusão de um *padding* de cortiça micro-aglomerada confinado no interior da porta lateral do automóvel, na área de protecção da zona pélvica do ocupante, como ilustrado na figura 7.1. Com a implementação deste componente espera-se que numa situação de colisão lateral, a cortiça absorva uma parte da energia do impacto de forma a minimizar a desaceleração e os esforços transmitidos aos ocupantes do veículo, especialmente na zona pélvica.

Para avaliar os benefícios da inclusão de um *padding* de cortiça micro-aglomerada realizaram-se simulações numéricas com o método dos elementos finitos, recorrendo ao LS-DynaTM. Realizaram-se simulações numéricas de colisão lateral, com e sem cortiça confinada no interior da porta. A configuração dos ensaios numéricos é desenvolvida de forma a aproximar todos os parâmetros às normas exigidas pela entidade europeia *European New Car Assessment Programme* (Euro NCAP), na realização de *crash tests* de impacto lateral. A configuração destes *crash tests* está representada esquematicamente na figura 1.2.

7.1 Modelação do ensaio

A simulação numérica de *crash tests* é de grande complexidade e requer um processo de modelação minucioso e muito dispendioso. Por este motivo, na realização de estudos quer em termos de avaliação do nível de *crashworthiness*, quer em termos de optimização estrutural, é geralmente criado um modelo simplificado que reproduza com alguma precisão o comportamento da estrutura global do automóvel. Deste modo, é possível

avaliar o comportamento e a eficiência de um determinado componente estrutural, evitando a modelação de todos os componentes do automóvel, garantindo bons resultados e precisão suficiente. Nas secções seguintes descreve-se o modelo simplificado utilizado, no âmbito deste trabalho, para avaliar a eficiência da inclusão de *padding*s de cortiça micro-aglomerada no interior da porta de um automóvel, em termos de segurança dos ocupantes.

7.1.1 Modelo do impactor

Os testes de impacto lateral consistem na colisão de um impactor deformável fixo a uma estrutura móvel com o automóvel, a uma velocidade inicial $v_0 = 13.89$ m/s (ver figura 1.2). De acordo com as normas impostas pela Euro NCAP [NCAP 04], o impactor é composto por seis zonas justapostas posicionadas como representado esquematicamente na figura 7.2. O impactor é empurrado por um carro e está dividido em duas zonas, a primeira composta por três blocos de dimensões $500 \times 500 \times 250$ [mm³] e a segunda, por três blocos de dimensões $500 \times 440 \times 250$ [mm³]. O material utilizado na construção do impactor é *honeycomb* de Alumínio com células de altura $h = 19$ mm. A primeira zona do impactor é constituída por *honeycomb* de Alumínio 3003 e a segunda por *honeycomb* de Alumínio 5052. As propriedades destes materiais são indicadas na tabela 7.1 [MatWeb 08]. No entanto, os dados fornecidos nos protocolos da Euro NCAP não são suficientes para o completo conhecimento dos materiais envolvidos. Adicionalmente, a construção da estrutura propulsora do impactor é, na realidade, bastante complexa e a descrição da sua estrutura não está disponível. Esta complexidade da definição da estrutura do impactor está associada a factores como, por exemplo, os requisitos de pré-deformação nos blocos do impactor, algumas características específicas do seu comportamento mecânico, o sistema de fixação do bloco à estrutura propulsora, os sistemas de ventilação, *etc.* Deste modo, no âmbito deste trabalho, é unicamente possível modelar um sistema aproximado.

A primeira aproximação na modelação do impacto consiste no agrupamento das seis zonas que o constituem, numa só. Com esta aproximação consegue-se reduzir significativamente o tempo de cálculo e evita-se a definição de apoios/fixações entre aquelas zonas. Consequentemente, reduz-se significativamente o custo da simulação numérica. A geometria global do objecto impactor não é alterada e, por isso, não se espera que esta aproximação altere os resultados. Esta aproximação leva a uma combinação de materiais, já que o impactor, de acordo com as normas definidas pela Euro NCAP, é constituído por dois materiais distintos, identificados na tabela 7.1.

A utilização de um único material com propriedades médias é outra aproximação bastante vantajosa na medida em que pode reduzir significativamente o tempo dispendido na simulação numérica. Neste sentido, determinam-se as propriedades médias do material do impactor, nomeadamente da sua estrutura celular, representada esquematicamente na figura 7.3. Conhece-se a altura das células que o compõem ($h = 19$ mm), porém é desconhecida a espessura das paredes celulares sendo esta é uma informação essencial na determinação da densidade do material celular. Assume-se que a espessura das paredes celulares é $t = 0.1$ mm, já que se trata de um valor típico para células destas dimensões. Com estes parâmetros definidos pode finalmente obter-se a densidade ρ^* e, consequentemente, o módulo de elasticidade E^* , do material



Figura 7.1: Representação da porta lateral de um automóvel com *padding* de cortiça implementado, vista do interior do habitáculo.

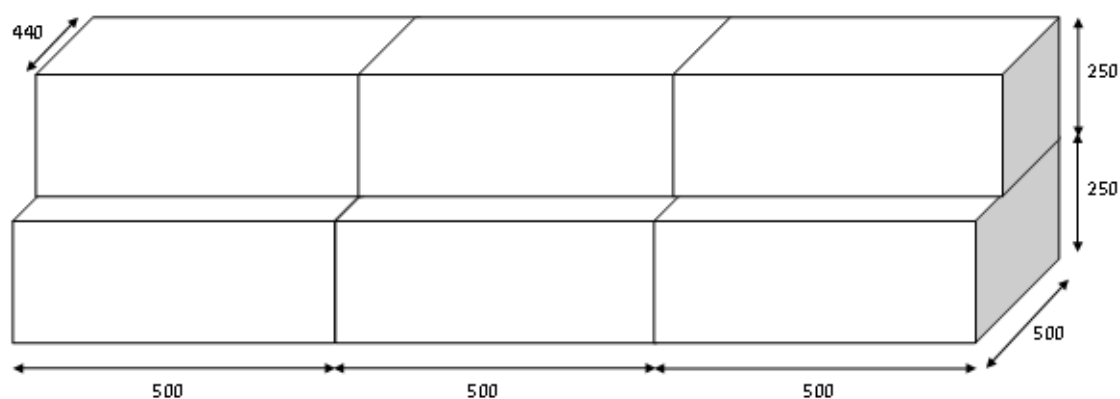


Figura 7.2: Representação esquemática do impactor segundo as normas de Euro NCAP em testes de impacto lateral [NCAP 04].

através das igualdades definidas por Gibson e Ashby [Gibson 97], isto é,

$$\frac{E^*}{E_s} = \frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{t}{l}, \quad (7.1)$$

em que E_s e ρ_s são o módulo de elasticidade e a densidade do material que constitui as paredes celulares do material, respectivamente, t é a espessura das paredes celulares e l é o comprimento das arestas do hexágono, com $h = \sqrt{3}l$.

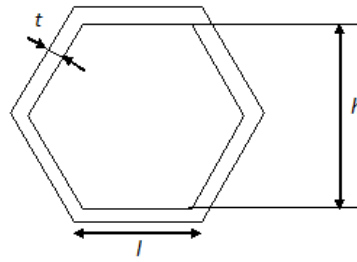


Figura 7.3: Representação esquemática de uma célula de *honeycomb*.

Neste sentido, determinaram-se as propriedades mecânicas dos dois tipos de *honeycomb* de Alumínio constituintes do impactor. Para o modelo numérico do material do impactor consideraram-se as médias aritméticas destas propriedades, indicadas na tabela 7.1. A curva de comportamento tensão-deformação do material está representada na figura 7.4. Este modelo constitutivo pode ser definido analiticamente, por partes, de acordo com a formulação seguinte [Mines 04]:

$$\sigma = \begin{cases} 0.739 \times 10^6 \varepsilon & \text{se } \varepsilon \geq 0.03 \\ 22 \times 10^6 + \frac{0.35 \times 10^6 (\varepsilon - 0.03)}{0.711 - \varepsilon} & \text{se } \varepsilon < 0.03 \end{cases} \quad (7.2)$$

O objecto impactor representado na figura 7.2 é empurrado por uma estrutura propulsora, como ilustrado na figura 1.2. A configuração geométrica desta estrutura não é especificada no protocolo de impacto lateral. Sabe-se, no entanto, que o peso total do sistema impactor corresponde a uma massa $m_{ti} = 950$ kg. Em última análise, a geometria do carro não é significativamente relevante para as condições do ensaio numérico, sendo de maior relevo a geometria do objecto que estabelece contacto com a parte lateral do veículo impactado. Deste modo, sabendo que o bloco impactor da figura 7.2 corresponde a uma massa¹ $m_i = 10.13$ kg, adicionou-se ao sistema uma massa $m_c = m_{ti} - m_i = 939.87$ kg, correspondente à massa do carro na parte anterior do impactor.

¹A massa do bloco impactor é estimada a partir das propriedades médias do *honeycomb* de Alumínio que o constitui.

Tabela 7.1: Propriedades mecânicas do *honeycomb* de Alumínio do impactor.

Material	E_s [GPa]	$\sigma_{y,s}$ [MPa]	ν_s	ρ_s [kg/m ³]	ρ^* [kg/m ³]	E^* [MPa]
Al 3003	68.9	124	0.33	2730	28.737	725.27
Al 5052	70.3	193	0.33	2680	28.737	753.81
Impactor	69.6	158.5	0.33	–	28.737	739.54

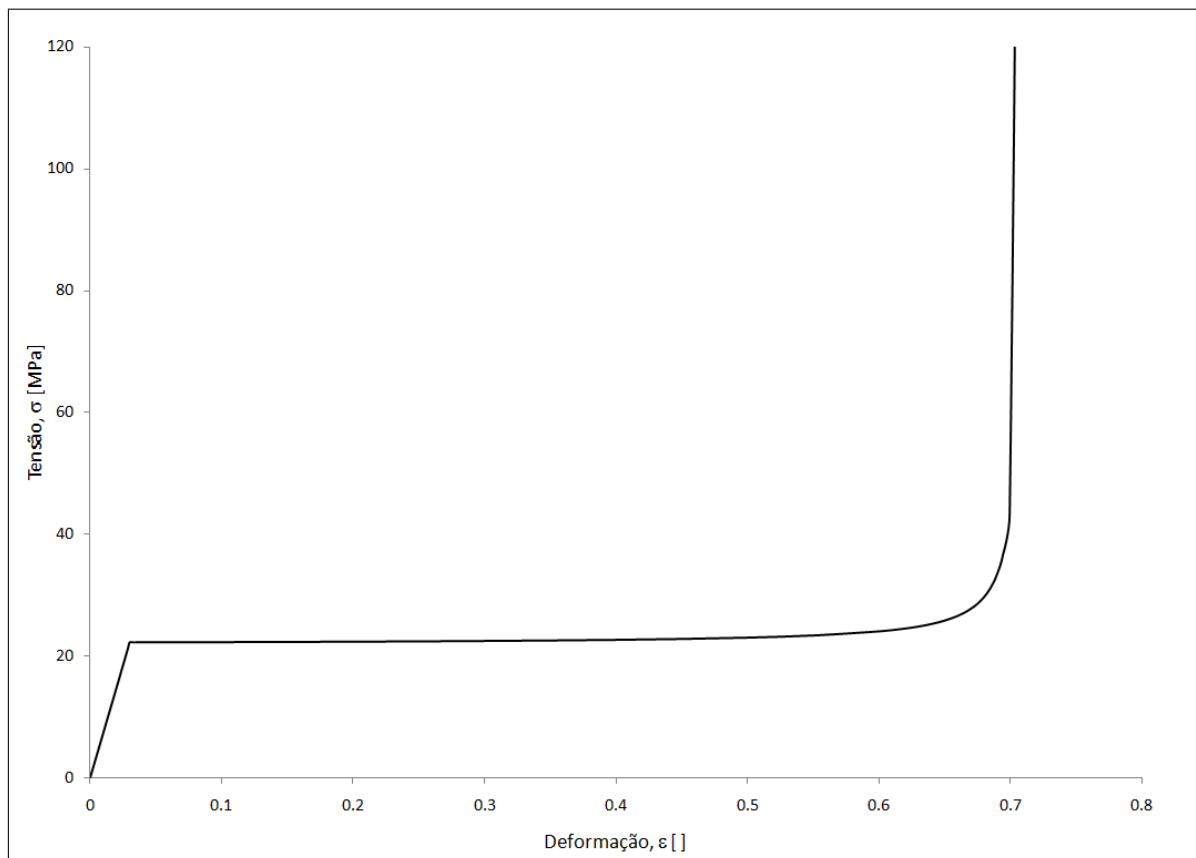


Figura 7.4: Curva de comportamento à compressão do *honeycomb* de Alumínio utilizado no impactor da simulação numérica de uma colisão lateral. A escala da tensão foi truncada para facilitar a visualização do patamar de tensão. O valor máximo é $\sigma = 260.2$ MPa, correspondente a uma deformação $\epsilon = 0.94$.

7.1.2 Modelo do automóvel sujeito ao impacto

A estrutura completa de um automóvel é muito complexa e a construção de um modelo numérico que reproduza o seu comportamento é um processo muito minucioso e demasiado longo para se enquadrar no trabalho que aqui se apresenta. Assim, no que diz respeito a projectos de optimização localizada da estrutura automóvel, é usual recorrer-se a modelos simplificados, já que estes são geralmente suficientes e os resultados bastante satisfatórios. Deste modo, no âmbito deste trabalho, o único componente estrutural do veículo construído de forma rigorosa foi a porta lateral. Para reproduzir o comportamento dos elementos da restante estrutura aplicaram-se molas nos contornos exteriores da porta. O modelo simplificado desenvolvido está representado na figura 7.5.

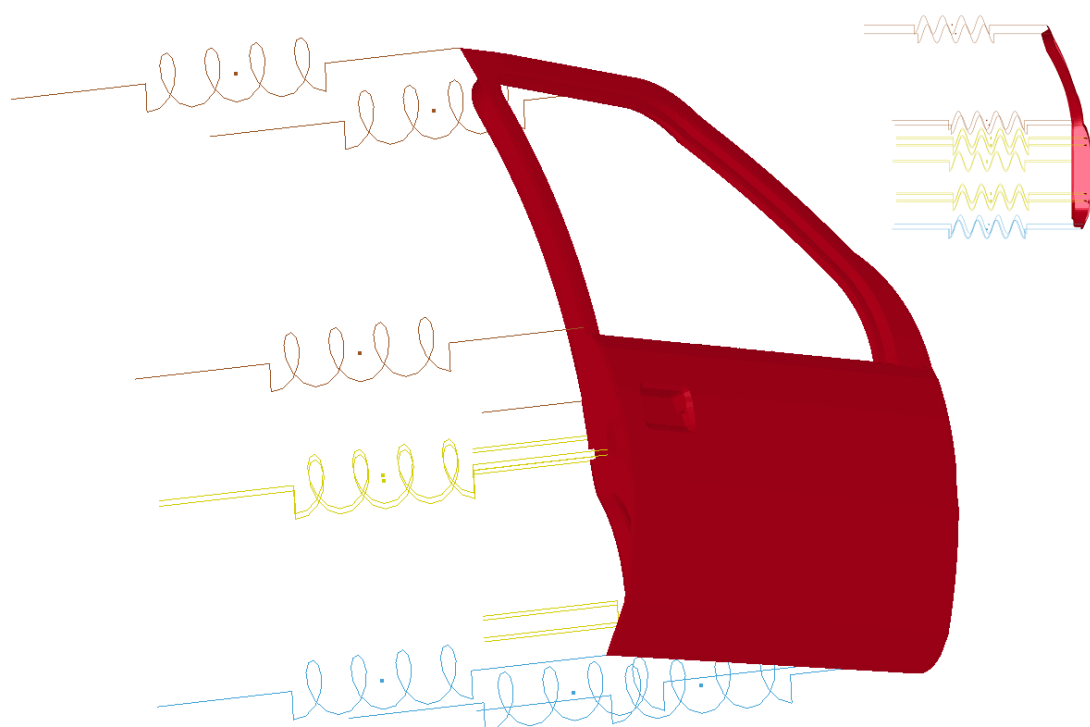


Figura 7.5: Representação do modelo simplificado da estrutura automóvel.

O modelo da porta foi desenhado a partir de uma porta de um automóvel ligeiro: um Peugeot 106, modelo de 1998. O material de construção da porta é um aço macio DC06, específico para estampagem, cujas propriedades estão indicadas na tabela 7.2. A curva de comportamento tensão-deformação do aço DC06 está representada no gráfico da figura 7.6 [Bouvier 01]. No modelo desenvolvido considera-se que a porta é construída por uma única folha de aço de espessura constante $t = 1$ mm.

Tabela 7.2: Propriedades mecânicas do aço DC06 utilizado no modelo da porta do automóvel.

Material	ρ [kg/m ³]	E [GPa]	ν
Aço DC06	7850	210	0.30

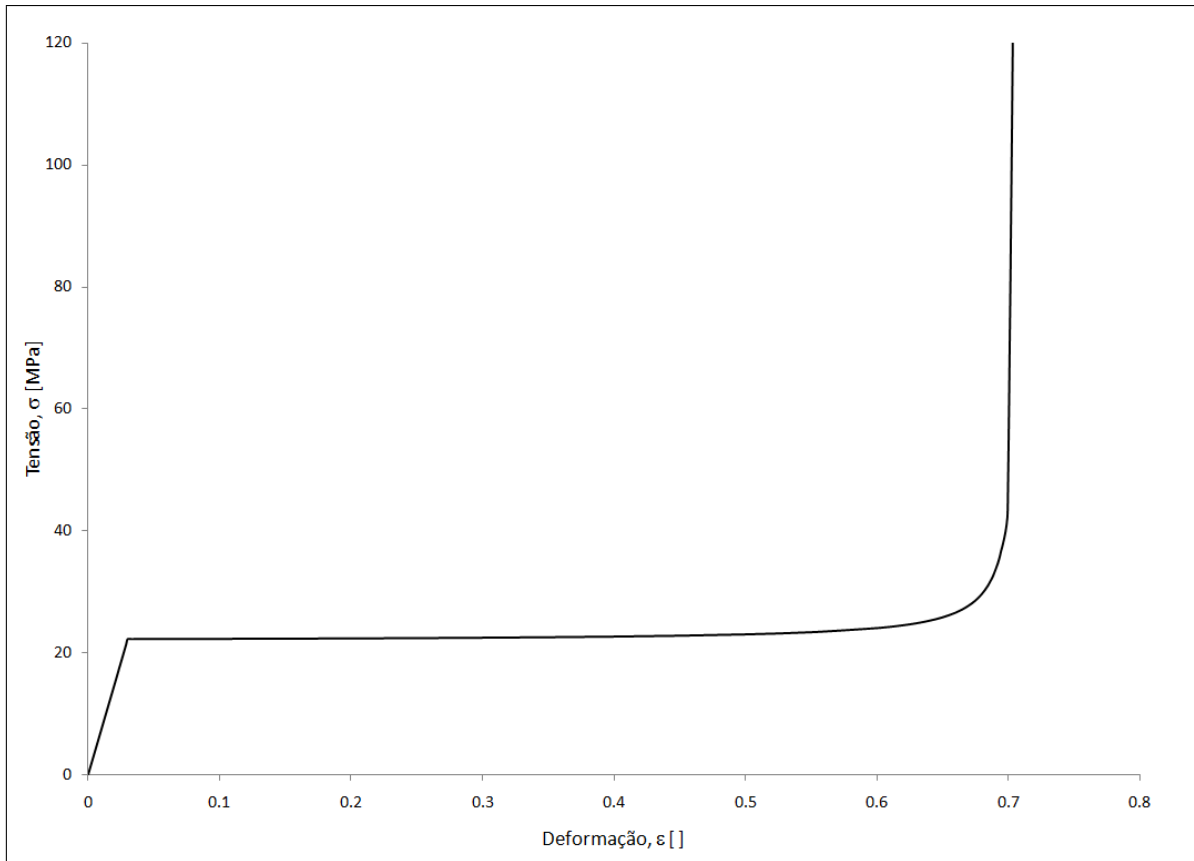


Figura 7.6: Curva de comportamento tensão-deformação do aço DC06.

A rigidez das molas aplicadas, para reproduzir a reacção da restante estrutura do automóvel ao impacto, foi calculada considerando quer a reacção estática quer dinâmica que o automóvel oferece ao impacto em análise. O peso total da estrutura automóvel contempla o peso da estrutura, que neste caso corresponde a uma massa $m_e = 870$ kg, e o peso de um ocupante de estrutura média, correspondente a uma massa $m_o = 80$ kg. Obtém-se, assim, uma massa total $m_{ta} = m_e + m_o = 950$ kg. Deste modo, obtém-se a força de reacção estática, F_e , que o sistema exerce através da relação

$$F_e = \mu(m_{ta}g), \quad (7.3)$$

em que μ é o coeficiente de atrito entre os pneus do automóvel e o asfalto.

Por outro lado, a força de reacção dinâmica foi estimada admitindo uma intrusão máxima da porta² de $d_{m\acute{a}x} = 0.50$ m, através do cálculo do trabalho que é necessário realizar para deslocar a estrutura de 950 kg com uma velocidade $v_0 = 13.89$ m/s ao longo de uma distância $d_{m\acute{a}x}$. Deste modo, recorrendo à relação

$$F_d = \frac{m_{ta}v^2}{2d_{m\acute{a}x}}, \quad (7.4)$$

²Esta estimativa de intrusão é baseada, unicamente, na observação empírica de impactos laterais em automóveis. Por este motivo, este pode ser um valor que carece de confirmação qualitativa, uma vez que é um factor determinante nos resultados absolutos. Porém, para efeitos de análise comparativa, a intrusão não é um valor relevante.

obtem-se o valor da força de reacção dinâmica, F_d . Portanto, a força de reacção que a estrutura exerce na situação de impacto em estudo neste trabalho, F_r , é igual à resultante das forças de reacção estática e dinâmica, isto é,

$$F_r = F_e + F_d = m_{ta} \left(\mu g + \frac{v_0^2}{2d_{\text{máx}}} \right). \quad (7.5)$$

Substituindo os valores conhecidos na expressão anterior chega-se a $F_r \approx 200$ kN.

A distribuição da força resultante na estrutura de suporte da porta é levada a cabo distribuindo estrategicamente 17 molas ao longo do contorno exterior da porta, como representado na figura 7.5. Uma vez definida a posição aproximada do centro de gravidade do automóvel [Solmaz 06], representado na figura 1.2 por R POINT, procedeu-se à distribuição adequada da força resultante. Para simplificação do problema, consideraram-se três grupos de molas aplicadas em três faixas horizontais distintas da porta. Na figura 7.5 as molas de cada zona são representadas esquematicamente com três cores diferentes. A força exercida pelas diversas molas³ é: (i) $F_{r1} = 8.540$ kN para o grupo de molas da zona superior da porta (a castanho na figura 7.5); (ii) $F_{r2} = 3.499$ kN para o grupo de molas da faixa central da porta (a amarelo na figura 7.5) e (iii) $F_{r3} = 43.614$ kN para o grupo de molas da zona inferior da moldura da porta (a azul na figura 7.5).

7.2 Modelação em LS-DynaTM

A modelação, o pré-processamento e a análise do ensaio numérico de impacto lateral na porta foram realizados recorrendo ao método dos elementos finitos e, em particular, ao programa LS-DynaTM.

7.2.1 Modelo de elementos finitos do impactor

Como referido na secção anterior, no âmbito deste trabalho o impactor foi considerado um corpo único. A malha de elementos finitos utilizada para discretizar o modelo do impactor é constituída por elementos hexaédricos de oito nós, com três graus de liberdade por nó e oito pontos de integração. Na figura 7.7 está representada esquematicamente a malha de elementos finitos utilizada na discretização do impactor. Dada a geometria regular do impactor, a malha aplicada é também regular e estruturada, com dimensão característica média dos elementos $l = 85$ mm. O impactor é constituído por *honeycomb* de Alumínio e, como tal, o modelo de comportamento do material utilizado é o *MAT_HONEYCOMB.

7.2.2 Modelo de elementos finitos da porta

Na modelação numérica da porta, os elementos finitos seleccionados para discretização da estrutura de espessura $t = 1$ mm foram elementos casca de quatro nós e sete pontos de integração. É um elemento finito do tipo Belytschko-Tsay, um dos mais utilizados

³ A força exercida por cada grupo de molas é calculada considerando a sua posição média em altura na porta e que tem que haver equilíbrio do momento horizontal destas forças em torno do centro de gravidade do automóvel.

na simulação de estruturas automóveis solicitadas a impacto [Gameiro 07a]. Porém, como elemento subintegrado, este apresenta desvantagens inerentes à existência de modos *hourglass* no elemento. As instabilidades, resultantes da existência de modos de energia nula, podem ser controladas através da activação de um módulo de controlo de *hourglass*, incorporado no LS-DynaTM. Este módulo de controlo designa-se por `*CONTROL_HOURLASS`. Sendo a porta o componente estrutural de maior importância em todo este trabalho, em termos de resultados, é conveniente a aplicação de malhas de elementos finitos relativamente refinadas. A dimensão característica média dos elementos casca utilizados é, deste modo, $l = 15$ mm. Na figura 7.8 está representada uma das malhas de elementos finitos aplicadas na porta. O modelo de comportamento do material utilizado para descrever o aço DC06, sendo este um metal com comportamento elasto-plástico, foi o modelo `*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY` que se mostrou ser o mais adequado.

7.2.3 Modelo de elementos finitos das molas

Para a representação das molas (ver figura 7.5), usadas no modelo numérico para representar a estrutura deformável do veículo, foram utilizados elementos discretos de dois nós, muito utilizados em sistemas de absorção de energia na representação de colisões de veículos. As molas são uma forma de modelar sistemas complexos através das definições atribuídas ao seu material. O comportamento do material admitido para estes elementos foi o modelo `*MAT_SPRING_ELASTIC`, que define o comportamento da mola através da atribuição da constante de rigidez do elemento, para molas de translação ou de rotação.

No âmbito deste trabalho, foram definidos três grupos de molas, de comprimento $l_0 = 1$ m, para os quais se definiram três materiais distintos. Os materiais utilizados diferem apenas na constante de rigidez atribuída, que depende da zona da porta em que estas são aplicadas relativamente ao centro de gravidade estimado do veículo.

7.2.4 Modelo de elementos finitos do *padding*

A modelação numérica do *padding* de micro-aglomerado de cortiça foi feita recorrendo a uma malha de elementos finitos tetraédricos de quatro nós, com dimensão característica média $l = 15$ mm. A malha de elementos finitos é a que se mostra na figura 7.9. O modelo de comportamento do material atribuído ao *padding* foi o `*MAT_HONEYCOMB`, como já tinha sido definido anteriormente, no Capítulo 4.

Na tabela 7.3 indicam-se as características das malhas de elementos finitos atribuídas a todos os componentes utilizados na construção do modelo simplificado utilizado nas simulações numéricas de impacto lateral.

7.2.5 Definição de contactos e condições de fronteira

É essencial, e de extrema importância, a definição da forma como cada componente envolvido na simulação interage quando em contacto com outros componentes. Para

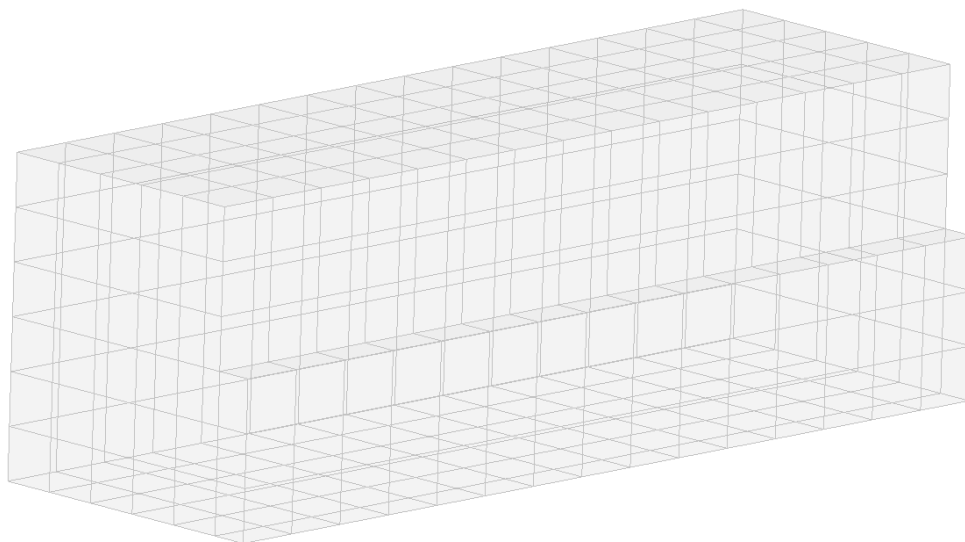


Figura 7.7: Representação esquemática da malha de elementos finitos utilizada na discretização do impactor.

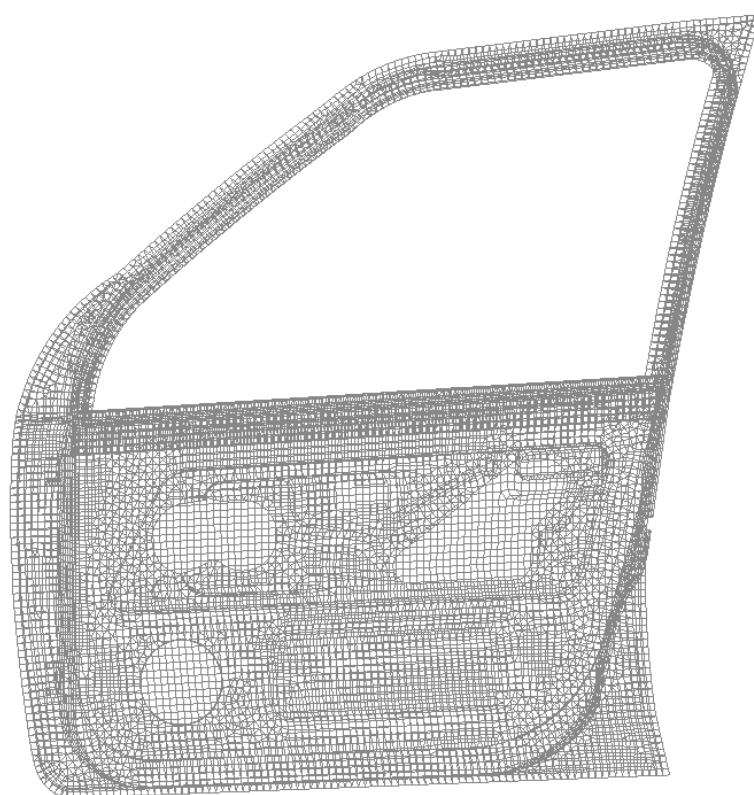


Figura 7.8: Ilustração da malha de elementos finitos aplicada na porta, utilizada nas simulações de *crash tests*.

Tabela 7.3: Características das malhas de elementos finitos atribuídas aos componentes do modelo global utilizado nas simulações numéricas de impacto lateral realizadas no âmbito deste trabalho.

	Tipo de Elemento	l [mm]	Nº de Elementos	Nº de Nós	DOF
Impactor	Sólido	85	495	736	2944
Porta	Casca	15	17163	17253	103518
Molas	Discreto	100	17	34	102
<i>Padding</i>	Sólido	15	7546	1785	5355

tal, existem variados modelos de contacto disponíveis na biblioteca do programa LS-DynaTM. No caso de estudo deste trabalho, é imediata a identificação de alguns dos componentes que interagem entre si, nomeadamente o impactor com a porta e a porta com o *padding*, para o caso dos ensaios realizados com cortiça confinada no interior da porta. Em ambos os casos, o modelo utilizado é o `*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE`, que previne a interpenetração dos componentes. O mesmo modelo foi utilizado para definir a interacção das superfícies internas e externas da estrutura da porta. Deve ainda referir-se, nesta fase, que um dos nós de cada elemento mola utilizado na simulação é comum a nós da porta e, como tal, não é necessária a criação de um modelo de contacto para a interacção entre estes componentes, já que nunca existe penetração ou deslizamento.

Na construção do modelo numérico do impactor, utilizou-se o contacto `*RIGIDWALL_PLANAR_MOVING`, que representa uma parede rígida infinita em movimento. No caso em estudo no âmbito deste trabalho, esta parede é posicionada na parte anterior do bloco impactor, de forma a transmitir movimento a este último, em substituição do carro a que é atrelado. À parede é atribuída uma velocidade inicial $v_0 = 13.89$ m/s e uma massa $m_c = 939.87$ kg.

Finalmente, de forma a tornar o sistema numericamente estável, fixam-se os nós das extremidades dos elementos mola que não são comuns aos nós dos elementos da malha de elementos finitos da porta. Restringiram-se, portanto, todos os graus de liberdade destes nós, evitando assim a possibilidade quer de rotação quer de translação.

A avaliação do nível de *crashworthiness* é feita pela Euro NCAP, através de critérios relacionados com a reacção dos ocupantes à colisão, isto é, avaliando os níveis de lesões provocadas nos ocupantes. Para tal, são utilizados modelos antropomórficos nos quais são implementadas células de carga e acelerómetros para medição de resultados. A concepção de um modelo numérico que represente este modelo antropomórfico é, no entanto, bastante complexa e sai fora do âmbito deste trabalho. Assim, a análise dos benefícios da implementação do *padding* de cortiça micro-aglomerada é feita avaliando os resultados obtidos em termos de aceleração e intrusão da porta lateral, na área da superfície interior da porta e na direcção da zona pélvica do ocupante.

Na figura 7.10 apresenta-se esquematicamente a configuração do modelo numérico global utilizado em todas as simulações realizadas no âmbito deste trabalho.

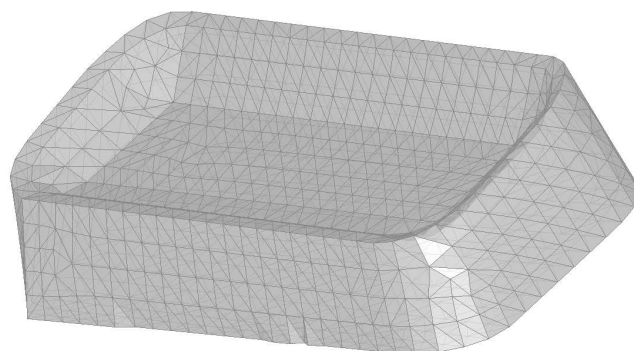


Figura 7.9: Ilustração da malha de elementos finitos aplicada no *padding*.

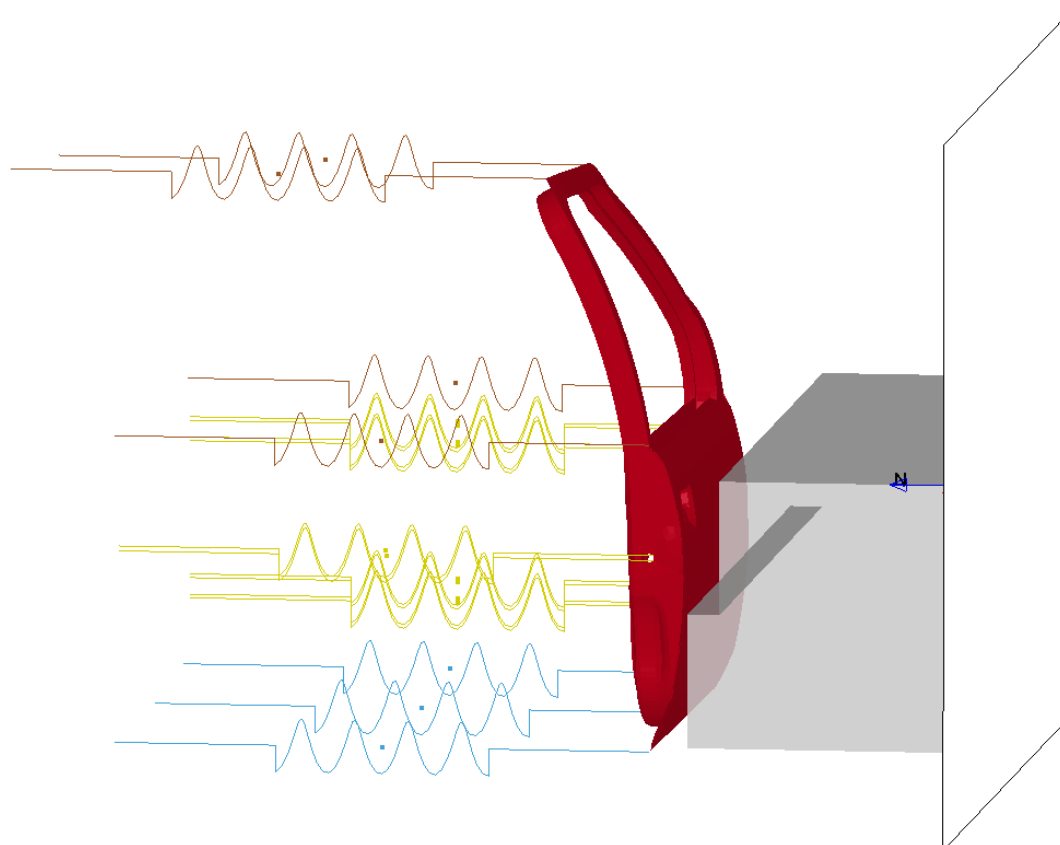


Figura 7.10: Representação esquemática do modelo global utilizado nas simulações numéricas de impacto lateral realizadas no âmbito deste trabalho.

Capítulo 8

Resultados e Discussão

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos nas simulações numéricas, realizadas em LS-DynaTM, de impacto lateral com e sem um *padding* de cortiça micro-aglomerada confinado no interior da porta lateral do automóvel. Os resultados de interesse no âmbito da segurança passiva – pico de aceleração, intrusão da porta no habitáculo e energia absorvida pela estrutura – são confrontados e avaliam-se as diferenças e os benefícios da implementação de um *padding* de cortiça.

Os resultados de interesse, no âmbito deste trabalho, são apresentados e discutidos nos parágrafos que se seguem. Neste capítulo, utilizam-se as designações C/ MAC e S/ MAC, para designar as variáveis relativas aos resultados obtidos na simulação numérica de impacto na porta com inclusão de *padding* de cortiça micro-aglomerada e sem *padding*, respectivamente.

A variação da força de reacção exercida na parede rígida móvel, alocada na parte anterior do bloco impactor, com o tempo está representada no gráfico da figura 8.1. Através da análise destes resultados pode observar-se um pico inicial de força que corresponde ao momento em que a parede entra em contacto com a parte anterior do bloco impactor. É este o momento em que se regista o valor máximo de força de toda a duração do ensaio numérico. Adicionalmente, este pico inicial de força dura menos de 0.5 ms numa fase do choque em que ainda não ocorreu qualquer tipo de intrusão. Portanto, não é relevante para a análise em causa. Nos instantes seguintes a força exercida na parede é nula até $t \approx 8$ ms. Durante este intervalo de tempo, a parede não está em contacto com o bloco impactor, no entanto, o bloco já entrou em contacto com a porta¹ desde o instante $t \approx 3$ ms. A partir deste instante a evolução da força de reacção na parede é significativamente mais elevada e instável na simulação numérica realizada sem *padding* de cortiça. Como tal, estes resultados sugerem uma melhoria significativa no comportamento ao choque. Esta melhoria é devida à inclusão do *padding* de cortiça micro-aglomerada no interior da porta do veículo.

Analisando os resultados apresentados pode ainda verificar-se que a força média exercida no impacto com *padding* de cortiça micro-aglomerada é significativamente inferior à força média do choque sem *padding*. A inclusão do *padding* resulta numa

¹Este efeito pode ser visualizado apenas na animação do ensaio numérico.

distribuição da força por toda a duração do choque, garantindo que não se atingem níveis de força demasiado elevados.

Para instantes próximos de $t = 90$ ms a força volta a ser nula. Este comportamento deve-se à separação total da parede rígida do impactor. Porém, nesta fase dos ensaios o sistema apresenta já movimento de corpo rígido e, portanto, não são considerados relevantes para este trabalho os resultados obtidos para instantes $t > 90$ ms.

No gráfico da figura 8.2 está representada a evolução da energia cinética do sistema com o tempo. Como se pode observar, ocorre um aumento brusco da energia cinética no instante $t \approx 3$ ms. Este instante corresponde ao momento em que o impactor inicia o contacto com a porta do automóvel. A partir deste instante, como seria de esperar, existe dissipação de energia inferida pela evolução decrescente da energia cinética, em ambos os casos estudados. Na simulação numérica com *padding* de cortiça a curva de energia cinética apresenta uma inflexão no instante $t \approx 77$ ms, com tendência crescente para instantes superiores. Através da análise dos resultados sob a forma de uma animação, pode verificar-se que, a partir deste instante, o movimento da porta é essencialmente de corpo rígido, deixando de existir acumulação de deformação. Esta inflexão é também visível na curva da evolução da energia cinética da simulação sem *padding*, porém, neste caso, para um instante superior ($t \approx 89$ ms). Deste modo, os resultados considerados na análise dos parâmetros relevantes no âmbito do trabalho, dizem respeito a instantes anteriores ao momento em que se verifica o início do movimento de corpo rígido da porta, correspondente a cada simulação, isto é, $t < 77$ ms no caso da simulação com inclusão de *padding* e $t < 89$ ms no ensaio sem *padding*.

No gráfico da figura 8.3 está representada a variação da aceleração e do deslocamento do ponto interior da porta do veículo, na direcção da zona pélvica, em função do tempo. Em termos de grau de intrusão, a implementação do *padding* de cortiça micro-aglomerada mostra ser vantajosa, uma vez que o deslocamento do interior da porta é cerca de 10% inferior ao deslocamento observado na simulação numérica realizada sem *padding*.

Em termos de pico de aceleração, de facto, o valor mais elevado verifica-se na simulação realizada com implementação de um *padding*. Porém, este valor máximo de aceleração ocorre para instantes a que correspondem valores nulos de deslocamento do ponto interior da porta (intrusão). Tal significa que nesta fase do impacto ainda não existe contacto com o ocupante. Para instantes posteriores a $t = 5$ ms, instante a partir do qual começa a ocorrer deslocamento da face interior da porta, observam-se valores máximos de aceleração $n_c = 2.2g$ e $n_s = 20.5g$, para as simulações com e sem cortiça confinada, respectivamente. Deste modo, verifica-se ocorrer uma redução significativa – da ordem de 89% – em termos de pico de aceleração, resultante da inclusão de *padding* de cortiça micro-aglomerada.

Na figura 8.4 está representada a evolução de energia absorvida pela estrutura do automóvel, de acordo com o modelo simplificado da figura 7.10, em função do tempo. Pode verificar-se que, durante todo o ensaio, o ensaio de colisão lateral com *padding* de cortiça micro-aglomerada, é o que exhibe maior capacidade de dissipação de energia. Contabilizando os resultados obtidos, pode determinar-se que a inclusão de *padding*s de cortiça micro-aglomerada induz ganhos de cerca de 9% na capacidade de absorção de energia.

Relativamente à energia envolvida nas simulações, verificou-se, de facto, a existência

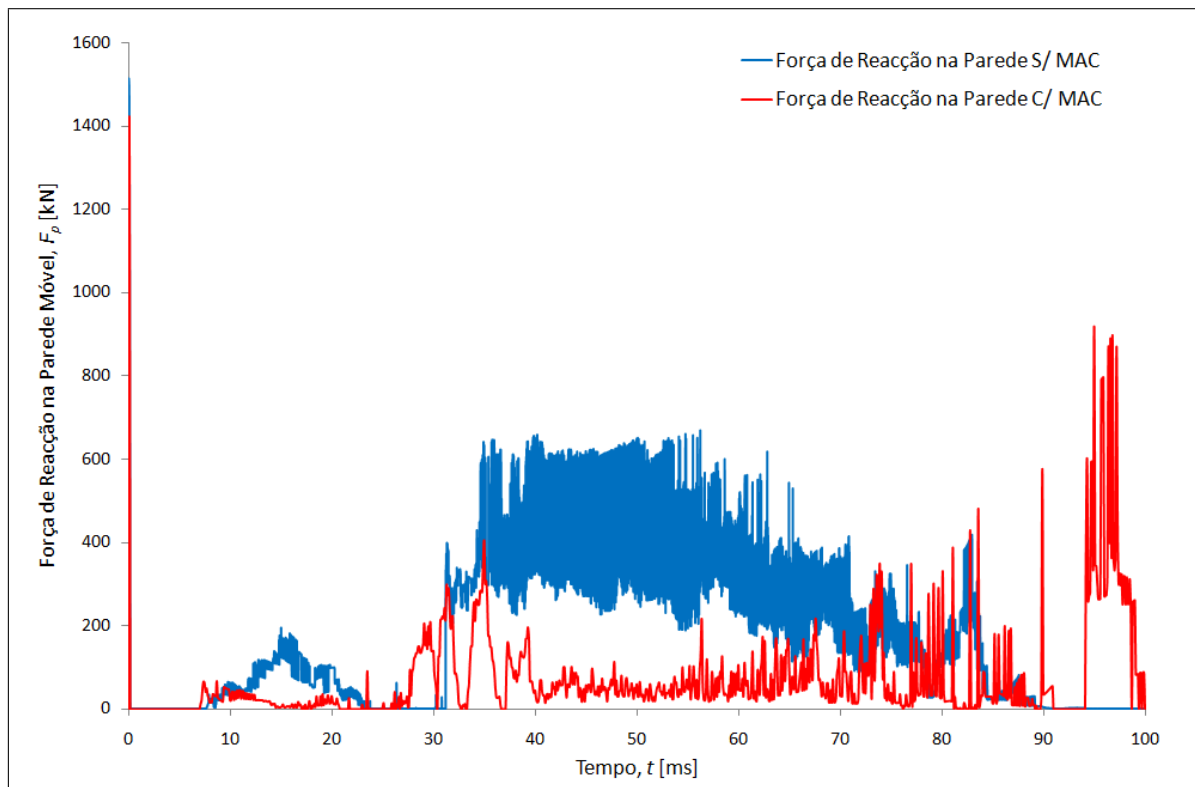


Figura 8.1: Variação da força de reacção na parede rígida móvel com o tempo, para as simulações de impacto lateral com (c/ MAC) e sem (s/ MAC) *padding* de cortiça micro-aglomerada.

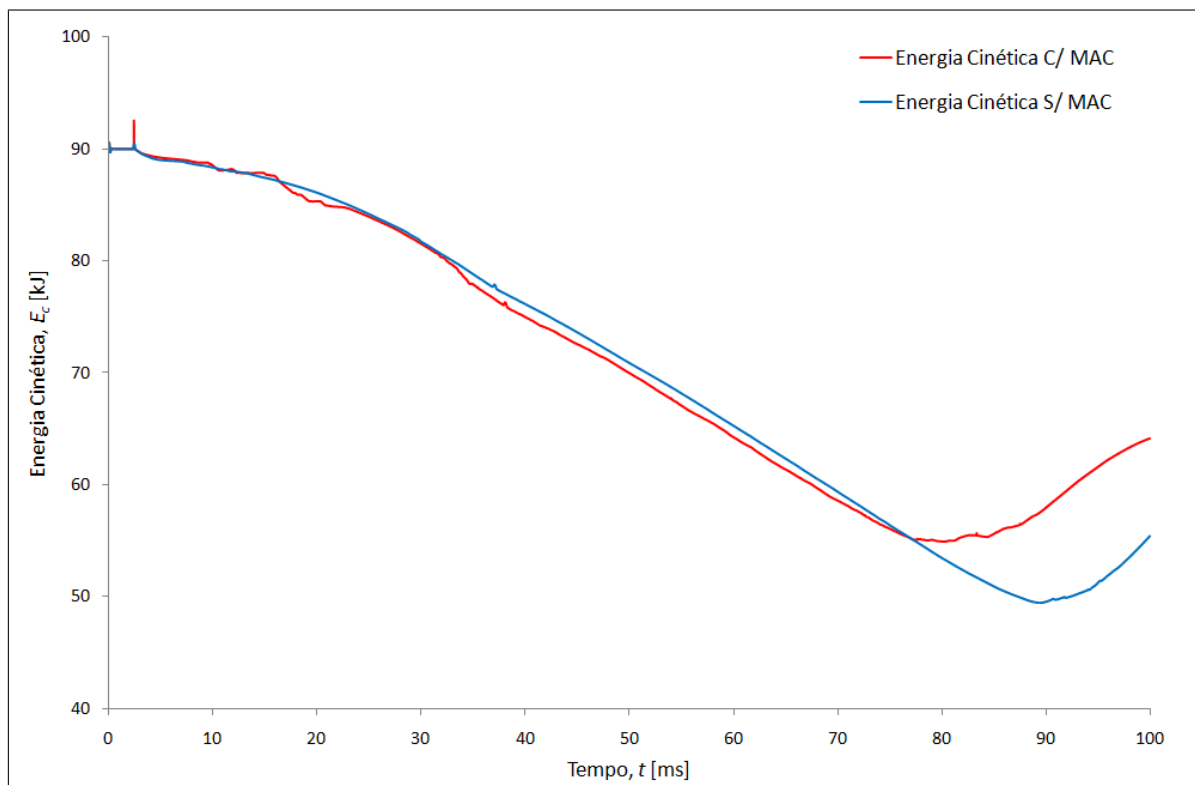


Figura 8.2: Evolução da energia cinética do sistema em função do tempo, para as simulações de impacto lateral com (c/ MAC) e sem (s/ MAC) *padding* de cortiça micro-aglomerada.

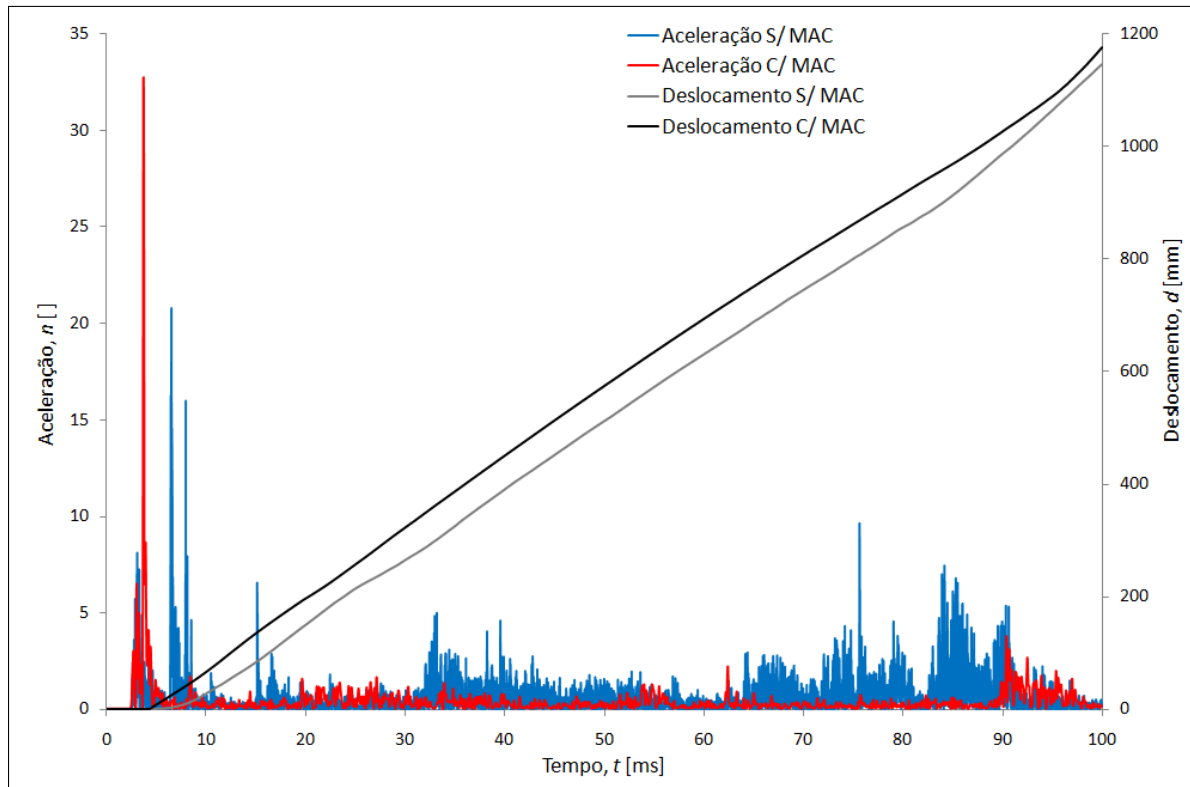


Figura 8.3: Variação da aceleração, em múltiplos da aceleração da gravidade, e do deslocamento do ponto interior da porta, na direcção da zona pélvica, em função do tempo, para as simulações de impacto lateral com (c/ MAC) e sem (s/ MAC) *padding* de cortiça micro-aglomerada.

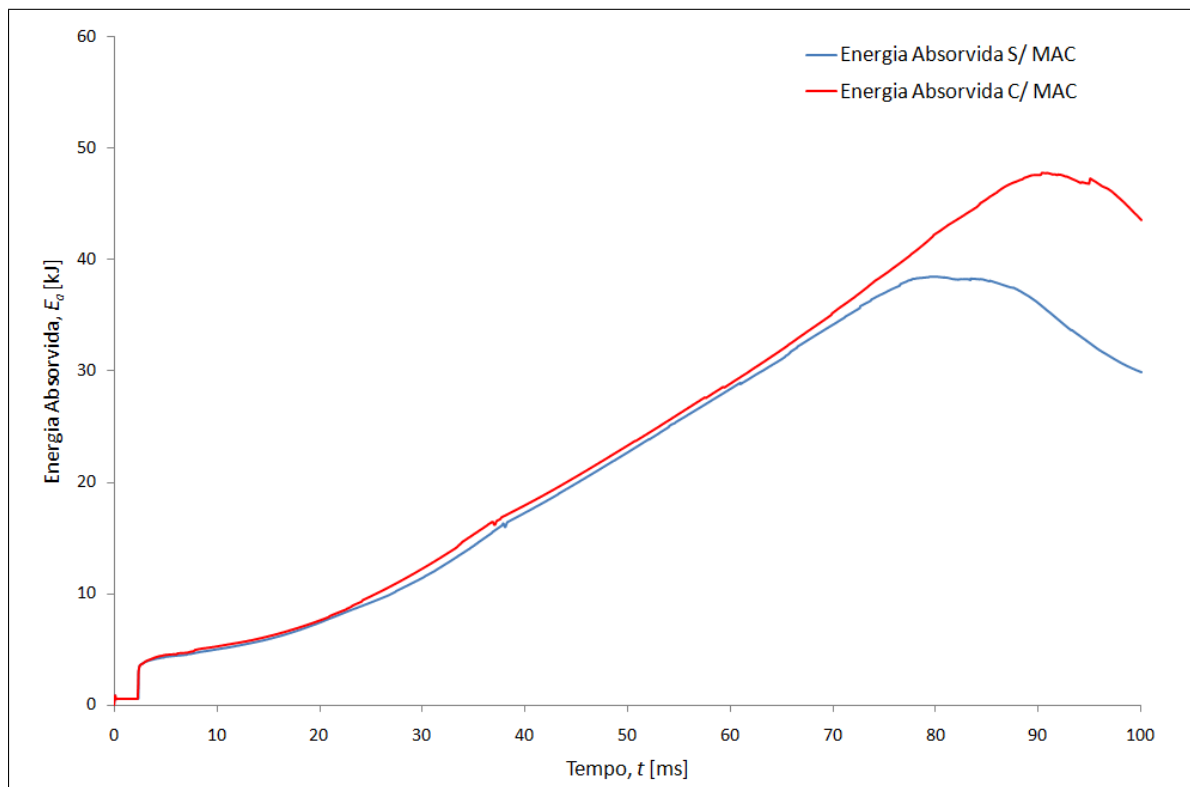


Figura 8.4: Evolução da energia absorvida pela estrutura do automóvel ao longo do tempo, para as simulações de impacto lateral com (c/ MAC) e sem (s/ MAC) *padding* de cortiça micro-aglomerada.

de energia de *hourglass*. Porém, a ordem de grandeza desta energia é semelhante em ambas as simulações numéricas e, portanto, não é necessária a sua análise detalhada.

Parte IV

Discussão e Conclusões

Capítulo 9

Discussão e Conclusões Gerais

Neste capítulo apresentam-se as conclusões gerais e discutem-se os resultados obtidos na realização deste trabalho.

O objectivo principal do trabalho que aqui se apresenta consiste em avaliar a aplicação inovadora de cortiça, na forma micro-aglomerada, como material de absorção de energia em sistemas de segurança passiva, nomeadamente em caso de impacto lateral.

A primeira fase desta dissertação consiste na caracterização de quatro materiais celulares em termos de capacidade de absorção de energia e potencial na aplicação em sistemas de segurança passiva em colisão lateral entre veículos automóveis. Nesse âmbito, estuda-se o comportamento mecânico da espuma de poliuretano, do IMPAXXTM, de uma espuma de Alumínio e da cortiça micro-aglomerada, quando solicitadas ao impacto para diversos valores de energia cinética inicial do impacto.

Os resultados obtidos nas simulações numéricas realizadas mostram que, em termos de quantidade de energia absorvida, a espuma de poliuretano é o material menos vantajoso. Este material apresenta valores de energia absorvida significativamente inferiores aos dos restantes materiais. Neste âmbito, os restantes materiais exibem comportamentos semelhantes e bastante satisfatório e, na gama de ensaios realizados, apresentam um comportamento muito aproximado do ideal¹. Em última análise, a cortiça micro-aglomerada exibe melhor comportamento do que a espuma de Alumínio. A cortiça não só absorve maior quantidade de energia em algumas situações, mas também exibe uma tendência para manter o comportamento ideal de absorção de energia, enquanto a espuma de Alumínio reduz a eficiência para valores de energia cinética inicial elevados.

Em termos de energia absorvida específica, os resultados obtidos com espuma de poliuretano são, na maioria das situações, invariantes com a energia cinética inicial do impacto. Os três restantes materiais apresentam uma variação de energia absorvida específica aproximadamente linear com a energia cinética inicial de impacto. Porém, o declive destas variações lineares é fortemente dependente do material. O IMPAXXTM é o material que apresenta valores mais elevados de energia absorvida específica, seguido pela cortiça e, finalmente, pela espuma de Alumínio.

¹Considera-se que o comportamento ideal corresponde à absorção de toda a energia inicial do impacto.

Em termos de absorção de energia, é importante, além da quantidade de energia absorvida pelo material, o modo como esta é absorvida. Em situação de colisão automóvel é essencial que os processos de absorção e dissipação de energia ocorram de forma gradual e, sempre que possível, controlada. Avaliou-se, neste âmbito, o *índice de desempenho* de cada material em função da energia cinética inicial de impacto. Para valores de energia cinética inicial mais reduzidos, é a cortiça micro-aglomerada que exhibe melhores resultados. A espuma de Alumínio é o material que apresenta índices de desempenho mais elevados para valores superiores de energia cinética. Já a espuma de poliuretano é o material que apresenta piores resultados em todas as simulações realizadas.

Em termos de pico de aceleração provocado pelo impacto, a espuma de poliuretano é, claramente, o material celular que apresenta piores resultados, com acelerações da ordem dos 50–110g, com tendência decrescente com o aumento da energia de impacto. A cortiça micro-aglomerada é o material mais vantajoso na maioria dos ensaios, com valores de aceleração máxima na ordem dos 3g. Segue-se a espuma de Alumínio, com picos de aceleração na mesma ordem de grandeza, para valores de energia cinética reduzidos, e com picos de aceleração na ordem de 20g para energias mais elevadas. Estes são os dois materiais que apresentam melhor comportamento em termos de pico de aceleração.

No que diz respeito à segurança passiva, o nível de intrusão no habitáculo do ocupante é um dos factores que deve ser analisado. Neste sentido, avaliou-se o deslocamento máximo observado nos ensaios para cada material. Na generalidade, é a espuma de Alumínio que induz menores deslocamentos, seguido pela cortiça e pelo IMPAXX™. Mais uma vez, a espuma de poliuretano mostrou ser o material menos indicado.

Através da análise dos resultados obtidos, pode verificar-se que a cortiça e a espuma de Alumínio mostram ter bastante potencial em aplicações de absorção de energia no âmbito da segurança passiva. No entanto, a espuma de Alumínio é um material significativamente mais dispendioso do que a cortiça e os processos de fabrico mais difíceis de controlar.

A segunda fase deste trabalho foi dedicada à análise dos benefícios da inclusão de *padding* de cortiça micro-aglomerada confinado no interior da porta lateral de um automóvel. Neste sentido, realizaram-se simulações numéricas de impacto lateral com e sem confinamento de cortiça. De facto, verificam-se melhorias significativas nos resultados obtidos na simulação numérica com *padding*. As forças envolvidas no decorrer do impacto são significativamente menores no caso da utilização de cortiça. Por outro lado, em termos de energia absorvida pela estrutura, de nível de intrusão no habitáculo do ocupante e de pico de aceleração, são visíveis melhorias significativas. No decorrer do impacto, a energia absorvida pela estrutura é, em média, cerca de 9% superior no caso da implementação de *padding* de cortiça micro-aglomerada e a intrusão máxima no habitáculo de ocupante é cerca de 10% inferior. Em termos de aceleração, os benefícios são bastante significativos, sendo o valor máximo de aceleração exibido na simulação realizada com inclusão de cortiça $n_c = 2.2g$ em confronto com um pico de aceleração de $n_s = 20.5g$ para a porta sem *padding*, que corresponde a uma redução em cerca de 89%.

Verifica-se, de facto, que a aplicação de *padding*s de cortiça micro-aglomerada no interior das portas laterais de um automóvel, pode resultar em benefícios significativos

em termos da segurança passiva em situação de colisão lateral, nomeadamente na protecção da zona pélvica dos ocupantes. No entanto, existem ainda diversos parâmetros que podem vir a ser avaliados no seguimento deste estudo tais como, por exemplo, a análise dos benefícios da implementação de um *padding* de maiores dimensões ou com geometrias diversas.

Lista de Figuras

1.1	Exemplo de um <i>crash test</i> de impacto lateral.	8
1.2	Representação esquemática da configuração dos <i>crash tests</i> realizados pela Euro NCAP [NCAP 08].	8
1.3	Materiais celulares de (a) célula fechada e (b) célula aberta.	11
1.4	Exemplo da curva de comportamento mecânico de um material celular em compressão.	13
1.5	Pranchas de cortiça após a sua extracção do sobreiro.	14
1.6	Desenhos de Robert Hooke da estrutura da cortiça [Hooke 65].	16
1.7	Observação com microscópio electrónico de varrimento da estrutura celular da cortiça [Gameiro 07a].	17
1.8	Representação esquemática de uma célula de cortiça.	17
4.1	Representação esquemática da configuração dos ensaios numéricos realizados para comparação do comportamento mecânico de alguns materiais celulares. Localização do ponto de referência A, utilizado para análise de resultados.	30
4.2	Representação esquemática do elemento finito sólido hexaédrico com oito nós utilizado para a caracterização do comportamento dos materiais [Hallquist 98].	32
4.3	Exemplos de espuma de Alumínio.	33
4.4	Curva de comportamento à compressão da espuma de Alumínio. Para facilitar a visualização, a escala de tensão foi truncada, sendo o valor máximo $\sigma = 240$ MPa, correspondente a uma deformação $\varepsilon = 0.71$	34
4.5	Variação da tensão equivalente de von Mises com o tempo ($E_{ci} = 5$ kJ). Ensaios numéricos de optimização de malha de elementos finitos.	36
4.6	Variação da tensão equivalente de von Mises com o tempo ($E_{ci} = 10$ kJ). Ensaios numéricos de optimização de malha de elementos finitos.	36
4.7	Dispersão dos valores da tensão máxima de von Mises com a configuração da malha ($E_{ci} = 5$ kJ).	37
4.8	Dispersão dos valores da tensão máxima de von Mises com a configuração da malha ($E_{ci} = 10$ kJ).	37
4.9	Ilustração das malhas testadas durante a fase de optimização da malha de elementos finitos. Malhas de elementos finitos com: (a) $l = 100$ mm, (b) $l = 50$ mm, (c) $l = 33$ mm, (d) $l = 20$ mm, (e) $l = 16$ mm, (f) $l = 10$ mm e (g) $l = 5$ mm.	38
4.10	Exemplos de aplicação de IMPAXX TM	39

4.11	Provetes de IMPAXX TM 300 (a) no início do ensaio de compressão e (b) após compressão.	40
4.12	Curvas experimentais de comportamento, obtidas para o IMPAXX TM 300 (compressão). A escala da tensão foi truncada para melhor visualização dos resultados.	42
4.13	Comportamento à compressão do IMPAXX TM 300. A escala da tensão foi truncada para melhor visualização. O valor máximo corresponde a $\sigma = 46.046$ MPa e $\varepsilon = 0.97$	42
4.14	Variação da energia acumulada e da força com o deslocamento para determinação da influência do coeficiente de Poisson no comportamento mecânico do IMPAXX TM	43
5.1	Variação da força de reacção na parede móvel em função do tempo com $E_{ci} < 30$ kJ, para os ensaios realizados com espuma de Alumínio. . . .	47
5.2	Variação da força de reacção na parede móvel em função do tempo com $E_{ci} \geq 30$ kJ, para os ensaios realizados com espuma de Alumínio. . . .	47
5.3	Variação da aceleração e da força de reacção na parede com o tempo para $E_{ci} = 30$ kJ, para os ensaios realizados com espuma de Alumínio. .	48
5.4	Variação da aceleração (ponto A, figura 4.1) em função do tempo para $E_{ci} < 30$ kJ, para as simulações realizadas com espuma de Alumínio. .	48
5.5	Variação da aceleração (ponto A, figura 4.1) em função do tempo para $E_{ci} \geq 30$ kJ, para as simulações realizadas com espuma de Alumínio. .	49
5.6	Variação da energia cinética da parede móvel em função do tempo para $E_{ci} < 30$ kJ, para as simulações realizadas com espuma de Alumínio. .	49
5.7	Variação da energia cinética da parede móvel em função do tempo para $E_{ci} \geq 30$ kJ, para as simulações realizadas com espuma de Alumínio. .	50
5.8	Evolução da energia acumulada da parede móvel e da força aplicada em função do deslocamento do ponto de referência (ponto A, figura 4.1) para $E_{ci} < 30$ kJ, para as simulações com espuma de Alumínio.	50
5.9	Evolução da energia acumulada da parede móvel e da força aplicada em função do deslocamento do ponto de referência (ponto A, figura 4.1) para $E_{ci} \geq 30$ kJ, para as simulações com espuma de Alumínio.	51
5.10	Variação da força de reacção na parede móvel em função do tempo, para os ensaios realizados com IMPAXX TM 300.	53
5.11	Variação da aceleração do ponto de referência (ponto A, figura 4.1) em função do tempo, para os ensaios realizados com IMPAXX TM 300. . . .	53
5.12	Variação da energia cinética da parede móvel em função do tempo, para os ensaios realizados com IMPAXX TM 300.	54
5.13	Variação da energia acumulada e da força de reacção na parede móvel em função do deslocamento do ponto de referência (ponto A, figura 4.1), para os ensaios realizados com IMPAXX TM 300.	54
5.14	Exemplos de espuma de poliuretano.	55
5.15	Curva de comportamento à compressão da espuma de poliuretano rígida. A escala da tensão foi truncada para facilitar a visualização do patamar de tensão. O valor máximo é $\sigma = 152.43$ MPa, correspondente a uma deformação $\varepsilon = 0.94$	57

5.16	Evolução da força de reacção na parede móvel em função do tempo, para as simulações realizadas com espuma de poliuretano.	58
5.17	Variação da aceleração do ponto de referência (ponto A, figura 4.1) em função do tempo, para as simulações realizadas com espuma de poliuretano.	58
5.18	Evolução da energia cinética da parede móvel em função do tempo, para as simulações realizadas com espuma de poliuretano.	59
5.19	Variação da energia acumulada e da força de reacção na parede móvel em função do deslocamento do ponto de referência (ponto A, figura 4.1), para as simulações realizadas com espuma de poliuretano.	59
5.20	Exemplos de folhas de cortiça micro-aglomerada.	60
5.21	Comportamento à compressão da cortiça micro-aglomerada [Gameiro 07a].	61
5.22	Variação da força de reacção da parede móvel em função do tempo, para as simulações realizadas com cortiça micro-aglomerada.	63
5.23	Variação da aceleração do ponto de referência (ponto A, figura 4.1) em função do tempo, para as simulações realizadas com cortiça micro-aglomerada.	63
5.24	Variação da energia cinética da parede móvel em função do tempo, para as simulações realizadas com cortiça micro-aglomerada.	64
5.25	Evolução da energia acumulada e da força de reacção na parede móvel em função do deslocamento do ponto de referência (ponto A, figura 4.1), para as simulações realizadas com cortiça micro-aglomerada.	64
6.1	Análise comparativa da energia absorvida por todos os materiais para as gamas de energia de impacto estudadas.	67
6.2	Análise comparativa da energia absorvida por unidade de massa para todos os materiais para as gamas de energia de impacto estudadas. . .	67
6.3	Variação de absorção de energia em função do tempo para diferentes valores de λ	69
6.4	Exemplo de curvas obtidas com a função analítica da energia absorvida no tempo e respectivas curvas obtidas numericamente consoante o factor de forma λ . As curvas numéricas são representadas a cinzento, estando algumas sobrepostas pelas cuvas analíticas.	69
6.5	Variação do índice de desempenho de absorção de energia de cada material em função da energia cinética inicial de impacto.	70
6.6	Variação da aceleração máxima do ponto de referência (ponto A, figura 4.1), em múltiplos da aceleração da gravidade, em função da energia cinética inicial do choque. O eixo da energia cinética inicial foi truncado para facilitar a visualização. A curva corresponde à espuma de Alumínio mantém o comportamento até $E_{ci} = 100$ kJ.	70
6.7	Deslocamento máximo do ponto de referência (ponto A, figura 4.1) em função da energia cinética inicial do choque.	72
7.1	Representação da porta lateral de um automóvel com <i>padding</i> de cortiça implementado, vista do interior do habitáculo.	77
7.2	Representação esquemática do impactor segundo as normas de Euro NCAP em testes de impacto lateral [NCAP 04].	77

7.3	Representação esquemática de uma célula de <i>honeycomb</i>	78
7.4	Curva de comportamento à compressão do <i>honeycomb</i> de Alumínio utilizado no impactor da simulação numérica de uma colisão lateral. A escala da tensão foi truncada para facilitar a visualização do patamar de tensão. O valor máximo é $\sigma = 260.2$ MPa, correspondente a uma deformação $\varepsilon = 0.94$	79
7.5	Representação do modelo simplificado da estrutura automóvel.	80
7.6	Curva de comportamento tensão-deformação do aço DC06.	81
7.7	Representação esquemática da malha de elementos finitos utilizada na discretização do impactor.	84
7.8	Ilustração da malha de elementos finitos aplicada na porta, utilizada nas simulações de <i>crash tests</i>	84
7.9	Ilustração da malha de elementos finitos aplicada no <i>padding</i>	86
7.10	Representação esquemática do modelo global utilizado nas simulações numéricas de impacto lateral realizadas no âmbito deste trabalho. . . .	86
8.1	Variação da força de reacção na parede rígida móvel com o tempo, para as simulações de impacto lateral com (C/ MAC) e sem (S/ MAC) <i>padding</i> de cortiça micro-aglomerada.	89
8.2	Evolução da energia cinética do sistema em função do tempo, para as simulações de impacto lateral com (C/ MAC) e sem (S/ MAC) <i>padding</i> de cortiça micro-aglomerada.	89
8.3	Variação da aceleração, em múltiplos da aceleração da gravidade, e do deslocamento do ponto interior da porta, na direcção da zona pélvica, em função do tempo, para as simulações de impacto lateral com (C/ MAC) e sem (S/ MAC) <i>padding</i> de cortiça micro-aglomerada.	90
8.4	Evolução da energia absorvida pela estrutura do automóvel ao longo do tempo, para as simulações de impacto lateral com (C/ MAC) e sem (S/ MAC) <i>padding</i> de cortiça micro-aglomerada.	90

Lista de Tabelas

4.1	Materiais utilizados na caracterização do comportamento mecânico ao impacto e respectivas siglas.	31
4.2	Propriedades mecânicas da espuma de Alumínio utilizada na caracterização dos materiais.	33
4.3	Referências e características dos ensaios numéricos realizados para optimização da malha.	35
4.4	Valores máximos de tensão de von Mises e diferenças relativas no processo de optimização da malha.	39
4.5	Propriedades mecânicas do IMPAXX TM utilizadas na caracterização dos materiais.	43
5.1	Propriedades mecânicas da espuma de poliuretano utilizadas na caracterização dos materiais.	56
5.2	Propriedades mecânicas da cortiça micro-aglomerada utilizadas na caracterização dos materiais [Gameiro 07a].	61
7.1	Propriedades mecânicas do <i>honeycomb</i> de Alumínio do impactor.	79
7.2	Propriedades mecânicas do aço DC06 utilizado no modelo da porta do automóvel.	80
7.3	Características das malhas de elementos finitos atribuídas aos componentes do modelo global utilizado nas simulações numéricas de impacto lateral realizadas no âmbito deste trabalho.	85

Bibliografia

- [ANSR 07] ANSR. *Sinistralidade Rodoviária 2006*. Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária, 2007. Ministério da Administração Interna - Direcção Geral de Viação, Observatório de Segurança Rodoviária.
- [Bois 04] P. Du Bois, C.C. Chou, B.B. Fileta, T.B. Khalil, A.I. King, H.F. Mahmood, H.J. Mertz e J. Wismans. *Vehicle Crashworthiness and Occupant Protection*. American Iron and Steel Institute, 2000 Town Center, Suite 320 Southfield, Michigan 48075, 2004.
- [Bouvier 01] S. Bouvier, C. Teodosiu, C. Maier, M. Banu e V. Tabacaru. *Selection and identification of elastoplastic models for the materials used in the benchmarks*. 18-Months Progress Report of the Digital Die Design Systems (3DS), 2001. WP3, Task 1, IMS 1999 000051.
- [Costa 03] A. Costa, H. Pereira e A. Oliveira. Variability of radial growth in cork oak adult trees under cork production. *Forest Ecology and Management*, vol. 175, no. 1-3, pp. 239–246, March 2003.
- [Costa 08] A. Costa, M. Madeira e A.C. Oliveira. The relationship between cork oak growth patterns and soil, slope and drainage in a cork oak woodland in southern portugal. *Forest Ecology and Management*, vol. 255, no. 5-6, pp. 1525–1535, April 2008.
- [Dow 06] The Dow Chemical Company. *IMPAXX 300 Energy Absorbing Foam - Tech Data Sheet*, Janeiro 2006. <http://automotive.dow.com/>.
- [Farag 08] M.M. Farag. Quantitative methods of materials substitution: Application to automotive components. *Materials & Design*, vol. 29, no. 2, pp. 374–380, 2008.
- [Fortes 87] M.A. Fortes e M.E. Rosa. *Compressão cíclica de cortiça*. Actas do Materiais 87, vol. II, pp. 321–334, Lisboa: Sociedade Portuguesa de Materiais, 1987.
- [Fortes 89] M.A. Fortes e M.T. Nogueira. The poisson effect in cork. *Materials Science and Engineering*, vol. A122, pp. 227–232, 1989.
- [Fortes 92] M.A. Fortes e M.E. Rosa. Growth stresses and strains in cork. *Wood Science and Technology*, vol. 26, pp. 241–258, 1992.

- [Fortes 04] M.A. Fortes, M.E. Rosa e H. Pereira. *A Cortiça*. IST Press, Lisboa, 2004.
- [Gama 01] B.A. Gama, T.A. Bogetti, B.K. Fink, C. Yu, T. Dennis Claar, H.H. Eifert e J. W. Gillespie Jr. Aluminum foam integral armor: a new dimension in armor design. *Composite Structures*, vol. 52, no. 3-4, pp. 381–395, 2001.
- [Gameiro 05] C.P. Gameiro, J. Cirne, G. Gary, V. Miranda, J. Pinho da Cruz e F. Teixeira-Dias. *Numerical and experimental study of the dynamic behaviour of cork*. Filipe Teixeira-Dias, Bradley Dodd, Erhardt Lach e Peter Schulz, editores, Design and Use of Light-Weight Materials, pp. 65–84. Proc. of the 3rd Light-Weight Armour Group Workshop: Design and Use of Light-Weight Materials, September 2005.
- [Gameiro 07a] C.P. Gameiro. *Capacidade de absorção de energia de impacto de estruturas tubulares com cortiça confinada - Estudo numérico e experimental*. PhD thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2007.
- [Gameiro 07b] C.P. Gameiro e J. Cirne. Dynamic axial crushing of short to long circular aluminium tubes with agglomerate cork filler. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 49, no. 9, pp. 1029–1037, September 2007.
- [Gameiro 07c] C.P. Gameiro, J. Cirne e G. Gary. Experimental study of the quasi-static and dynamic behaviour of cork under compressive loading. *Journal of Materials Science*, vol. 42, pp. 4316–4324, 2007.
- [Gameiro 07d] C.P. Gameiro, J. Cirne, V. Miranda, J. Pinho-da Cruz e F. Teixeira-Dias. Dynamic behaviour of cork and cork-filled aluminium tubes: Numerical simulation and innovative applications. *Holzforschung*, vol. 61, pp. 400–405, 2007.
- [GAO 95] GAO. *Highway Safety: Causes of Injury in Automobile Crashes*. Report to Congressional Requesters - Diane Publishing Company, Maio 1995. United States General Accounting Office.
- [Gibson 81] L.J. Gibson, K.E. Easterling e M.F. Ashby. The structure and mechanics of cork. *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. A377, pp. 99–117, 1981.
- [Gibson 97] L.J. Gibson e M.F. Ashby. *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge University Press, second edition edition, 1997.
- [Gil 94] L. Gil. Effect of hot pressing densification on the cellular structure of black agglomerated cork board. *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 52, no. 2, pp. 131–134, April 1994.

- [Gil 96] L. Gil. Densification of black agglomerate cork boards and study of densified agglomerates. *Wood Science and Technology*, vol. 30, no. 3, pp. 217–223, June 1996.
- [Gil 00] A.M. Gil, M.H. Lopes, C.P. Neto e P.T. Callaghan. An nmr microscopy study of water absorption in cork. *Journal of Materials Science*, vol. 35, no. 8, pp. 1891–1900, April 2000.
- [Gómez-Serrano 03] V. Gómez-Serrano, P. de la Rosa-Blanco, M.A. Diaz-Diez, A. Diaz-Parralejo e A. Macias-Garcia. A study on the density of agglomerates prepared from cork wastes. *Journal of Materials Science and Technology*, vol. 19, pp. 46–50, 2003.
- [Gouveia 01] M. Gouveia. *Cortiça: uma indústria tradicional virada para o futuro*. Diário Económico 18/6/2001., 2001.
- [Hallquist 98] J.O. Hallquist. *Ls-Dyna Theoretical Manual*. Livermore Software Technology Corporation, Maio 1998.
- [Hooke 65] R. Hooke. *Micrographia: or some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses*. J. Martyn e J. Allestry, first edition edition, 1665.
- [INE 07] INE. *Estatísticas dos Transportes 2006*. Instituto Nacional de Estatística, 2007. ISSN 1645-5401.
- [Kalpakjian 05] S. Kalpakjian e S. Schmid. *Manufacturing Engineering and Technology*. Addison-Wesley, 5^a edition, 2005.
- [Kim 95] G.H. Kim. Study of safety regulation for occupant protection in side impacts. *Journal of KSME*, vol. 35, pp. 525–541, 1995.
- [Lakes 86] R.S. Lakes. Experimental microelasticity of two porous solids. *International Journal of Solids and Structures*, vol. 22, no. I, pp. 55–63, 1986.
- [Lie 02] A. Lie e C. Tingvall. How do euro ncap results correlate with real-life injury risks? a paired comparison study of car-to-car crashes. *Traffic Injury Prevention*, vol. 3, no. 4, pp. 288–293, 2002.
- [Lim 97] J.M. Lim, J.W. Choi e G. Park. Automobile side impact modelling using atb software. *International Journal of Crashworthiness*, vol. 2, no. 3, pp. 287–298, 1997.
- [Majumder 04] S. Majumder, A. Roychowdhury e S. Pal. Dynamic response of the pelvis under side impact load - a three-dimensional finite element approach. *International Journal of Crashworthiness*, vol. 9, no. 1, pp. 89–103, 2004.
- [Mano 02] J.F. Mano. The viscoelastic properties of cork. *Journal of Materials Science*, vol. 37, pp. 257–263, 2002.

- [Mano 07] J.F. Mano. Creep-recovery behaviour of cork. *Materials Letters*, vol. 61, no. 11-12, pp. 2473–2477, May 2007.
- [Marat-Mendes 03] J.N. Marat-Mendes e E.R. Neagu. The study of electrical conductivity of cork. *Ferroelectrics*, vol. 294, pp. 123–131, 2003.
- [MatWeb 08] MatWeb. *Material Property Data*. <http://www.matweb.com/>, 2008. Consulta no dia 23 de Abril.
- [Mines 04] R.A.W. Mines. A one-dimensional stress wave analysis of a lightweight composite armour. *Composite Structures*, vol. 64, no. 1, pp. 55–62, April 2004.
- [Morris 99] R.A. Morris, J.R. Crandall e W.D. Pilkey. Multibody modelling of a side impact test apparatus. *International Journal of Crashworthiness*, vol. 4, no. 1, pp. 17–30, 1999.
- [NCAP 04] Euro NCAP. *European New Car Assessment Program - Side Impact Protocol*. Euro NCAP, versão 4.1 edition, Março 2004.
- [NCAP 08] Euro NCAP. *European New Car Assessment Programme*. <http://www.euroncap.com/testprocedures.aspx>, 2008. Consulta no dia 20 de Janeiro.
- [Nóvoa 04] P.J.R.O. Nóvoa, M.C.S. Ribeiro, A.J.M. Ferreira e A.T. Marques. Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified with cork granulates. *Composites Science and Technology*, vol. 64, no. 13-14, pp. 2197–2205, October 2004.
- [Pereira 87] H. Pereira, M.E. Rosa e M.A. Fortes. The cellular structure of cork from quercus suber. *IAWA Bulletin*, vol. 8, pp. 213–218, 1987.
- [Pereira 92] H. Pereira, J. Graça e C. Baptista. The effect of growth-rate on the structure and compressive properties of cork. *IAWA Bulletin*, vol. 13, pp. 389–396, 1992.
- [Pereira 07] H. Pereira. *Cork: Biology, Production and Uses*. Elsevier Science, 2007.
- [Pina 96] P. Pina e M.A. Fortes. Characterization of cells in cork. *Journal of Physics*, vol. D29, pp. 2507–2514, 1996.
- [RealCork 07] RealCork. *Sector da Cortiça em Números 2007 - Cork Information Bureau*. www.realcork.com, 2007. Estatísticas.
- [Rosa 88a] M.E. Rosa e M.A. Fortes. Rate effects on the compression and recovery of dimensions of cork. *Journal of Materials Science*, vol. 23, no. 3, pp. 879–885, March 1988.
- [Rosa 88b] M.E. Rosa e M.A. Fortes. Stress relaxation and creep of cork. *Journal of Materials Science*, vol. 23, no. 1, pp. 35–42, January 1988.

- [Rosa 91] M.E. Rosa e M.A. Fortes. Deformation and fracture of cork in tension. *Journal of Materials Science*, vol. 26, pp. 341–348, 1991.
- [Rosa 93] M.E. Rosa e M.A. Fortes. Water absorption by cork. *Wood and Fiber Science*, vol. 25, pp. 339–348, 1993.
- [Samaha 03] R.R. Samaha e D.S. Elliot. *NHTSA side impact research: Motivation for upgraded test procedures*. Proceedings of the 18th Conference on the enhanced safety of vehicles, Nagoya, Japan, Maio 2003. paper 492.
- [Schiff 08] M.A. Schiff, A.F. Tencer e C.D. Mack. Risk factors for pelvic fractures in lateral impact motor vehicle crashes. *Accident Analysis & Prevention*, vol. 40, no. 1, pp. 387–391, January 2008.
- [Shim 00] V.P.W. Shim, Z.H. Tu e C.T. Lim. Two-dimensional response of crushable polyurethane foam to low velocity impact. *International Journal of Impact Engineering*, vol. 24, no. 6-7, pp. 703–731, July 2000.
- [Solmaz 06] S. Solmaz, M. Akar e R. Shorten. *Online Center of Gravity Estimation in Automotive Vehicles using Multiple Models and Switching*. Rapport technique, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., December 2006.
- [Teixeira 96] M.J. Teixeira, A.C. Fernandes, B. Saramago, M.E. Rosa e J.C. Bordado. Influence of the wetting properties of polymeric adhesives on the mechanical behaviour of cork agglomerates. *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 10, pp. 1111–1127, 1996.
- [Tencer 05] A.F. Tencer, R. Kaufman, C. Mack e C. Mock. Factors affecting pelvic and thoracic forces in near-side impact crashes: a study of us-ncap, nass, and ciren data. *Accident Analysis & Prevention*, vol. 37, no. 2, pp. 287–293, March 2005.
- [Tencer 07] A.F. Tencer, R. Kaufman, P. Huber, C. Mock e M.L. Rout. Reducing primary and secondary impact loads on the pelvis during side impact. *Traffic Injury Prevention*, vol. 8, no. 1, pp. 101–106, 2007.
- [Vaz 98] M.F. Vaz e M.A. Fortes. Friction properties of cork. *Journal of Materials Science*, vol. 33, no. 8, pp. 2087–2093, Abril 1998.
- [Wang 06] D. Wang, G. Dong, J. Zhang e S. Huang. Car side structure crashworthiness in pole and moving deformable barrier side impacts. *Tsinghua Science & Technology*, vol. 11, no. 6, pp. 725–730, December 2006.
- [WHO 04] WHO. *World report on road traffic injury prevention*. Publications of the World Health Organization, 2004. World Health Organization, Margie Peden et al.

- [Zhang 98] J. Zhang, N. Kikuchi, V. Li, A. Yee e G. Nusholtz. Constitutive modeling of polymeric foam material subjected to dynamic crash loading. *International Journal of Impact Engineering*, vol. 21, no. 5, pp. 369–386, May 1998.